



Tesis - TM142501

**PEMODELAN *NATURAL CONVECTION* DAN *SOLIDIFICATION*  
PROSES PEMBEKUAN AIR DI DALAM CETAKAN ES  
DENGAN GEOMETRI YANG BERBEDA**

ANDREAS PUJIANTO

2114 202 008

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



Thesis - TM142501

**MODELING OF NATURAL CONVECTION AND SOLIDIFICATION  
WATER FREEZING PROCESS IN ICE CAN  
WITH DIFFERENT GEOMETRY**

ANDREAS PUJIANTO

2114 202 008

SUPERVISOR

Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.

MASTER PROGRAM

FIELD STUDY OF ENERGY CONVERSION ENGINEERING

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOVENBER

SURABAYA

2016

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)**


**di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Oleh :**

**Andreas Pujianto  
Nrp. 2114202008**

**Tanggal Ujian : 18 Juli 2016  
Periode Wisuda : September 2016**

**Disetujui Oleh :**

**1. Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.  
NIP. 19650505 199003 1 005**



**(Pembimbing)**

**2. Dr. Ir. Budi Utomo K.W., ME.  
NIP. 19531219 1981 03 1 001**



**(Penguji)**

**3. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.  
NIP. 19660402 198903 1002**



**(Penguji)**

**4. Ary Bachtiar K.P., ST., MT., Ph.D  
NIP. 19710524 199702 1 001**



**(Penguji)**

**Direktur Program Pascasarjana,**



**Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D**

**NIP. 19601202 198701 1 001**

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



**PEMODELAN *NATURAL CONVECTION* DAN *SOLIDIFICATION***  
**PROSES PEMBEKUAN AIR DI DALAM CETAKAN ES**  
**DENGAN GEOMETRI YANG BERBEDA**

Nama mahasiswa : Andreas Pujiyanto  
NRP : 2114202008  
Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.

**ABSTRAK**

Hal yang menarik perhatian dalam pembuatan es balok salah satunya adalah perbedaan bentuk cetakan es. Penelitian yang dilakukan yaitu untuk mengetahui fenomena *natural convection* kondisi *steady* dan fenomena *solidification* kondisi transien untuk cetakan es 25 kg berbentuk bujur sangkar dan persegi panjang.

Penelitian ini menampilkan pemodelan *natural convection* kondisi *steady* dan *solidification* kondisi transien untuk proses pembekuan air di dalam *cavity* dengan pemodelan 2D menggunakan *software* komersial CFD. *Natural convection* ditampilkan dengan dua *isothermal vertical wall* yang mempunyai perbedaan temperatur ( $\Delta T$ ) = 8 °C. Kasus *solidification* menampilkan pendinginan dari tiga *wall* bertemperatur -8°C dan satu *wall* bertemperatur 0°C. Temperatur awal dari fluida untuk kedua kasus tersebut adalah 4 °C.

Kesetimbangan termal terjadi untuk kasus *natural convection* pada kedua sisi *cold* dan *hot wall*. Bujur sangkar memiliki nilai perpindahan panas lebih besar 21,82 % dari persegi panjang karena luas permukaan dan koefisien konveksinya lebih baik. Pelepasan energi dalam (sensibel dan laten) dari air ke *wall* cetakan menyebabkan *solidification* terjadi. Perkembangan *solid fraction* pada cetakan persegi panjang lebih cepat sebesar 7,03 % dari bujur sangkar saat proses pembekuan 15 jam. Perpindahan panas pada *top* dan *bottom wall* pada persegi panjang lebih besar dari pada bujur sangkar pada waktu yang sama.

Kata kunci : Cetakan es, *natural convection*, *solidification*, perpindahan panas

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



**MODELING OF NATURAL CONVECTION AND SOLIDIFICATION  
WATER FREEZING PROCESS IN ICE CAN  
WITH DIFFERENT GEOMETRY**

By : Andreas Pujianto  
Student Identity Number : 2114202008  
Supervisor : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.

**ABSTRACT**

Interesting things in the production of ice blocks one of them is the different shapes of ice can. The study was conducted to know the phenomenon of steady state natural convection and transient solidification for square and rectangular ice can having size 25 kg.

The study presents modeling steady state natural convection and transient solidification for water freezing process in the cavity with the 2d modeling using commercial CFD software. Natural convection is presented with two isothermal vertical walls that have temperature difference ( $\Delta T$ ) = 8 °C. Solidification case presents cooling from three walls which have temperature -8°C and one wall which has temperature 0°C. Initial temperature from the fluid for both of cases is 4 °C.

Thermal equilibrium occurred in the case of natural convection on both sides of cold and hot wall. The square shape has greater heat transfer rate 21.82 % than the rectangular shape because the surface area and convection coefficient better. The release of energy (sensible and latent) of the water to the ice can wall causing solidification occurred. The growth of solid fraction for rectangular shape is 7.03 % faster than square shape at 15 hours freezing process. Heat transfer at the top and bottom wall in rectangular shape is greater than square shape in the same time.

Key words : Ice can, natural convection, solidification, heat transfer

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga dapat menyelesaikan laporan tesis ini. Sholawat dan salam tetap kami panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sebagai suri tauladan kami.

Dalam penulisan laporan tesis ini tidak semata-mata karena kemampuan penulis, melainkan karena adanya bantuan dari berbagai pihak yang telah membantu dalam penyelesaian laporan ini. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu, yakni:

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng. selaku dosen pembimbing laporan tesis yang telah banyak memberikan bimbingan, arahan dan ilmunya.
2. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng, PhD selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Tim dosen penguji yang telah bersedia memberikan waktu, tenaga, dan pikiran dalam rangka perbaikan laporan tesis ini.
4. Bapak dan Ibu dosen di lingkungan Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan ilmunya baik secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis.
5. Segenap keluarga besar Poltek KP Sorong dan BPSDM KP dari Kementerian Kelautan dan Perikanan yang telah memberikan dukungannya.
6. Kedua orang tua dan istri yang selalu memberikan doa dan motivasinya.
7. Anak saya yang pertama “Jihan Nabila Putri” yang menguatkan motivasi dalam menyelesaikan laporan ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa Magister RKE 2014 yang telah memberikan bantuan dan motivasinya.

9. Seluruh pihak yang belum disebutkan di atas yang telah memberikan do'a, bantuan, dan dukungannya bagi penulis sehingga laporan tesis ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Penulisan laporan tesis ini masih banyak kekurangan, oleh karena itulah demi kesempurnaan segala kritik dan saran sangat penulis harapkan. Akhir kata semoga laporan tesis ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua dalam pengembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xix
DAFTAR SIMBOL .....	xxi
PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	4
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1. Penelitian Terdahulu .....	5
2.2. Dasar Teori .....	14
2.2.1. <i>Natural Convection</i> Pemanasan dari Samping .....	14
2.2.1.1. Kriteria Berdasarkan <i>Vertical Layer</i> .....	16
2.2.1.2. Kriteria Berdasarkan Horizontal <i>Jet</i> .....	17
2.2.1.3. Nusselt <i>number</i> untuk kriteria <i>boundary layer regime</i> .....	19
2.2.2. <i>Solidification</i> .....	21
METODE PENELITIAN .....	25
3.1. Bentuk Cetakan Es dan Geometri Pemodelan .....	25
3.2. Parameter Uji .....	26

3.3. <i>Mesh</i> dan <i>Boundary Condition</i> .....	27
3.4. Metode Perhitungan Numerik.....	29
3.5. <i>Grid</i> Independensi dan Validasi.....	30
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....	31
4.1 Natural Convection.....	31
4.1.1. Perpindahan Panas <i>Natural Convection</i> .....	32
4.1.2 Pergerakan Aliran Fluida di Dalam <i>Cavity</i> .....	34
4.1.3 <i>Thermal</i> dan <i>Velocity Boundary Layer</i> .....	35
4.2 <i>Solidification</i> pada Cetakan Es Balok .....	37
4.3 <i>Solidification</i> dengan <i>Boundary Condition</i> yang Berbeda .....	38
KESIMPULAN DAN SARAN .....	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran .....	48
DAFTAR PUSTAKA.....	49



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Proses pembekuan es di dalam cetakan 25 kg dengan bentuk bujur sangkar.....	1
Gambar 2.1 <i>liquid solid interface</i> dan <i>streamline</i> proses <i>solidification</i> timah cair saat (a) 0,077 jam; (b) 0,529 jam; dan (c) 1,896 jam (Rady dan Mohanty,1996) .....	5
Gambar 2.2 Perkembangan <i>liquid solid interface</i> untuk proses <i>solidification</i> timah cair (Rady dan Mohanty, 1996; data numerik dan eksperimen Wolff dan Viskanta, 1988).....	6
Gambar 2.3 Kontur isothermal temperatur <i>dimensionless</i> proses <i>solidification</i> asam laurat saat $\tau = 1$ (Vynnycky dan Kimura, 2007) .....	7
Gambar 2.4 Perbandingan ketebalan solid ( <i>sav</i> ) sebagai fungsi time <i>dimensionless</i> ( $\tau$ ) untuk $Ra = 107$ (Vynnycky dan Kimura, 2007) .....	8
Gambar 2.5 Lokasi <i>liquid solid interface</i> dan aliran partikel pada $t = 38,2$ menit untuk a) $T_h = 6^\circ\text{C}$ ; b) $T_h = 8^\circ\text{C}$ ; c) $T_h = 10^\circ\text{C}$ ; dan d) $T_h = 15^\circ\text{C}$ (Yeoh, dkk., 1990).....	9
Gambar 2.6 (a) Grafik profil temperatur <i>dimensionless</i> ; (b) Grafik profil kecepatan <i>dimensionless</i> arah y kondisi <i>steady</i> pada <i>horizontal mid plane</i> (Michalek dan Kowalewski, 2003).....	10
Gambar 2.7 (a) Kontur temperatur; (b) Kontur dan vektor kecepatan <i>magnitude</i> kondisi <i>steady</i> (Michalek dan Kowalewski, 2003).....	10
Gambar 2.8 (a) Grafik profil temperatur <i>dimensionless</i> ; (b) Grafik profil kecepatan arah y <i>dimensionless</i> pada <i>horizontal mid plane</i> pada $t = 100$ s (Michalek dan Kowalewski, 2003) .....	11
Gambar 2.9 (a) Kontur temperatur; (b) vektor kecepatan <i>magnitude</i> pada $t = 100$ s (Michalek dan Kowalewski, 2003).....	11
Gambar 2.10 Variasi densitas air sebagai fungsi dari temperatur dengan batas dari $-20^\circ\text{C}$ sampai $20^\circ\text{C}$ (Bourdillon, dkk., 2015) .....	12

Gambar 2.11 Kontur temperatur dan vektor kecepatan <i>magnitude</i> dari kondisi <i>steady natural convection</i> hasil simulasi OpenFOAM (Bourdillon, dkk., 2015) .....	13
Gambar 2.12 <i>Liquid-solid interface</i> dan vektor kecepatan <i>magnitude</i> hasil simulasi simulasi FLUENT, OpenFOAM , dan NC4MARV2 pada $t = 100$ s (Bourdillon, dkk., 2015).....	14
Gambar 2.13 <i>Enclosure</i> persegi panjang dua dimensi dengan <i>isothermal sidewall</i> (Bejan, 2013) .....	15
Gambar 2.14 Perkembangan dua struktur <i>layer</i> dekat <i>hot wall</i> (Bejan, 2013) .....	16
Gambar 2.15 Empat <i>regime</i> perpindahan panas untuk <i>natural convection</i> di dalam <i>enclosure</i> pemanasan dari samping (Bejan, 2013) .....	18
Gambar 2.16 Pola sirkulasi aliran fluida berdasarkan keempat <i>regime</i> (Bejan, 2013).....	19
Gambar 2.17 Tiga <i>regime</i> untuk laminar <i>natural convection</i> pada <i>shallow enclosure</i> ( $H/L < 1$ ) (Bejan dan Tien,1978) .....	19
Gambar 2.18 $Nu$ dari <i>boundary layer regime</i> dengan batasan $Ra_{1/7H/L} \rightarrow \infty$ (Bejan, 2013; data diperoleh dari Gill, 1966).....	20
Gambar 2.19 Pergerakan permukaan <i>boundary</i> untuk proses <i>solidification</i> 1 dimensi (Ozisik dan David, 2012) .....	22
Gambar 2.20 Proses <i>solidification</i> pada area <i>semi infinite liquid</i> (Jiji, 2009) .....	24
Gambar 3.1 Bentuk cetakan es 25 kg dengan ukurannya .....	25
Gambar 3.2 Geometri pemodelan.....	26
Gambar 3.3 Bentuk <i>mesh</i> geometri bujur sangkar dan persegi panjang.....	28
Gambar 3.4 <i>Boundary condition</i> bujur sangkar dan persegi panjang untuk kasus <i>natural convection</i> .....	28
Gambar 3.5 <i>Boundary condition</i> bujur sangkar dan persegi panjang untuk kasus <i>solidification</i> .....	29
Gambar 3.6 pengujian <i>grid</i> independensi .....	30
Gambar 4.1 Kontur temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) dari kasus <i>natural convection</i> kondisi <i>steady</i> .....	31
Gambar 4.2 $Nu_Y$ lokal <i>hot</i> dan <i>cold wall</i> untuk proses <i>natural convection</i> .....	33

Gambar 4.3 Vektor kecepatan <i>magnitude</i> (m/s) untuk proses <i>natural convection</i>	34
Gambar 4.4 <i>Streamline</i> (kg/s) untuk proses <i>natural convection</i> .....	35
Gambar 4.5 <i>Thermal boundary layer</i> pada <i>hot wall</i> .....	36
Gambar 4.6 <i>Velocity boundary layer</i> pada <i>hot wall</i> .....	37
Gambar 4.7 Lapisan es pada cetakan kondisi nyata (kiri) dan pemodelan (kanan) saat proses pembekuan 1,5 jam .....	38
Gambar 4.8 Kontur temperatur (°C) dari kasus <i>solidification</i> kondisi transien saat 4 jam, 8 jam, dan 12 jam .....	40
Gambar 4.9 Grafik penyerapan dan pelepasan energi panas dari air ke <i>wall</i> cetakan es selama proses <i>solidification</i> .....	41
Gambar 4.10 Distribusi temperatur untuk $y/h = 0,5$ saat 4 jam, 8 jam, dan 12 jam .....	42
Gambar 4.11 Kontur <i>liquid fraction</i> selama proses <i>solidification</i> .....	43
Gambar 4.12 Grafik ketebalan lapisan es pada $y/h = 0,5$ dari <i>rightwall</i> .....	44
Gambar 4.13 Grafik <i>solid fraction</i> selama proses <i>solidification</i> .....	45

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Properti fluida air .....	26
Tabel 4.1 Penyerapan dan pelepasan energi panas hasil solusi pemodelan .....	32
Tabel 4.2 <i>Nusselt number</i> rata-rata dari perpindahan panas .....	33

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



## DAFTAR SIMBOL

### Simbol Huruf

$A$	: Luas permukaan bidang ( $m^2$ )
$C$	: variabel dari <i>source term</i> (Pers.2.26 & 2.27)
$C_p$	: Panas spesifik (kJ/kg.K)
$f_l$	: <i>fraction liquid</i>
$g$	: Percepatan gravitasi ( $m^2/s$ )
$H$	: Tinggi bidang (m)
$h(T)$	: <i>Enthalpy</i> temperatur tertentu (kJ/kg)
$k$	: Konduktivitas termal (W/m.K)
$L$	: Panjang bidang (m)
$\overline{Nu}$	: <i>Average nusselt number</i>
$Nu_y$	: <i>Local Nusselt number</i>
$P$	: Tekanan (Pa)
$Ra$	: <i>Rayleigh number</i>
$Ra_H$	: <i>Rayleigh number</i>
$Pr$	: <i>Prandtl number</i>
$s_{av}$	: Ketebalan <i>solid</i>
$S_u$	: <i>Source term</i> momentum arah x (Pers. 2.20)
$S_v$	: <i>Source term</i> momentum arah y (Pers. 2.21)
$t$	: Waktu (s)
$T$	: Temperatur ( °C )
$T_c$	: Temperatur <i>cold wall</i> ( °C )
$t_f$	: <i>time of convective boundary layer development</i> (s)
$T_f$	: Temperatur fusi ( °C )
$T_h$	: Temperatur <i>hot wall</i> ( °C )
$T_{hot}$	: Temperatur <i>hot wall</i> ( °C ) (Vynnycky dan Kimura, 2007)
$T_l$	: Temperatur <i>liquid</i> ( °C )

$T_s$	: Temperatur <i>solid</i> ( °C )
$T_{melt}$	: Temperatur <i>melting</i> ( °C )
$T_0$	: Temperatur awal ( °C )
$q'$	: Nilai perpindahan panas per satuan panjang (W/m)
$\dot{Q}$	: Nilai perpindahan panas (J/s)
$u$	: Kecepatan arah x (m/s)
$v$	: Kecepatan arah y (m/s)
$\nu$	: <i>Kinematic viscosity</i> ((m <sup>2</sup> /s)
$x$	: Koordinat arah x (m)
$x_i$	: Posisi arah x tertentu permukaan solid (m) (pers. 2.31)
$y$	: Koordinat arah y (m)

### Simbol Huruf Yunani

$\alpha$	: <i>Thermal diffusivity</i> (m <sup>2</sup> s)
$\Lambda$	: <i>Dimensionless coefficient</i> (Vynnycky dan Kimura, 2007)
$\beta$	: <i>thermal expansion coefficient</i> (1/K)
$\beta_0$	: <i>thermal expansion coefficient</i> awal (1/K)
$\delta$	: Ketebalan lapisan es (mm) (Gambar 4.11)
$\delta_T$	: Ketebalan <i>thermal boundary layer</i> (m)
$\delta_v$	: Ketebalan <i>velocity boundary layer</i> (m)
$\Delta T$	: Selisih temperatur ( °C )
$\lambda$	: Panas laten (kJ/kg) (Pers. 2.17)
$\mu$	: Viskositas dinamik (kg/m.s)
$\rho_0$	: Densitas awal (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_s$	: Densitas solid (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho(T)$	: Densitas pada temperatur tertentu (kg/m <sup>3</sup> )
$\theta_s$	: Temperatur <i>dimensionless</i> (Vynnycky dan Kimura, 2007)
$\tau$	: <i>Time dimensionless</i>
$\infty$	: Bilangan tak hingga

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Industri pembuatan es sangat berperan dalam berbagai sektor seperti perikanan tradisional maupun kuliner. Bentuk dari es pun beragam disesuaikan dengan kebutuhan. Es balok adalah satu jenis es yang sering digunakan dan diproduksi dalam jumlah besar. Standar cetakan es yang dipakai dalam pembuatan es balok umumnya berbentuk bujur sangkar atau persegi panjang dengan massa es 25 kg, 50 kg, dan 100 kg.



Gambar 1.1 Proses pembekuan es di dalam cetakan 25 kg dengan bentuk bujur sangkar

Pembentukan es di dalam cetakannya adalah salah satu contoh kasus *natural convection* dan *solidification* di dalam *cavity*. Gambar 1.1 memperlihatkan pendinginan dari keempat sisi cetakan es dimana temperaturnya lebih rendah dibandingkan dengan air di dalamnya. Bahan pendingin yang digunakan adalah air garam yang disirkulasikan di dalam *pond* oleh agitator melewati evaporator sistem refrigerasi untuk melepaskan energi panasnya. Air garam yang digunakan dengan jumlah konsentrasi tertentu untuk disesuaikan dengan batas temperatur pendinginan yang diinginkan.

Energi panas adalah bentuk energi yang dapat dipindahkan dari satu sistem ke sistem yang lain sebagai akibat dari perbedaan temperatur (Cengel, 2003).

Perpindahan panas yang terjadi antar sistem ini dapat berupa proses penyerapan ataupun pelepasan energi panas tergantung dari besarnya energi yang terkandung di dalam sistem. Panas sensibel dan laten adalah dua jenis energi panas yang terkandung di dalam suatu sistem. Panas sensibel berkaitan dengan peningkatan ataupun penurunan derajat temperatur serta berkaitan dengan pergerakan molekul. Sedangkan panas laten berkaitan dengan perubahan wujud atau fasa dari sistem itu sendiri.

Proses penyerapan dan pelepasan energi panas baik berupa panas sensibel atau laten dapat ditemukan dalam kasus *natural convection* dan *solidification*. Kasus *natural convection* terjadi karena perbedaan temperatur antara permukaan *solid* dan fluida yang saling kontak dan mengakibatkan pergerakan molekul dari fluida tersebut. Pergerakan molekul ini disebabkan karena gaya *buoyancy* dari perbedaan densitas molekul itu sendiri. Sedangkan kasus perpindahan panas transien yang melibatkan proses peleburan atau *solidification* secara umum dikenal sebagai kasus perubahan fasa atau pergerakan *boundary* yang penting di beberapa aplikasi teknik seperti pembuatan es, pembekuan makanan, *solidification* dalam pembuatan logam, penyimpanan energi termal, pengolahan bahan kimia dan plastik, pertumbuhan kristal, ablasi aerodinamis, pengelasan logam dan logam campuran, serta banyak yang lainnya (Hahn & Ozisik, 2012).

Ada beberapa penelitian yang melakukan pemodelan kasus *natural convection* dan *solidification* di dalam *enclosure*. Pemodelan *natural convection* dengan perubahan densitas air menggunakan metode *high-order polynomial* dilakukan oleh Michalek & Kowalewski (2005), sedangkan McDonough & Faghiri (1993) selain melakukan eksperimen, pemodelan numerik juga dilakukan baik secara transien maupun *steady*. Michalek & Kowalewski (2003) melakukan pemodelan *natural convection* dan *solidification* yang dilakukan secara terpisah dengan menggunakan *software* komersial CFD *code* Fluent dan Frecon3v *finite difference code*. Pemodelan ini dilakukan dengan selisih temperatur ( $\Delta T$ ) antara *hot* dan *cold wall* adalah 10 °C dengan  $Ra = 2,5 \times 10^6$ . Kasus *natural convection* dianalisa dalam kondisi *steady* dengan temperatur awal 5°C. Pemodelan *solidification* sendiri dianalisa secara transien dengan kondisi awal menggunakan solusi temperatur dan kecepatan dari kondisi *steady natural convection* yang telah

dilakukan. Hal yang sama juga dilakukan oleh Bourdillon et al. (2015), tetapi dengan menggunakan *software* CFD code OpenFoam.

Hal yang menarik perhatian dalam pembuatan es balok adalah perbedaan bentuk cetakan es. Bentuk cetakan es yang berbeda meskipun memiliki massa es yang sama dapat berpengaruh terhadap fenomena *natural convection* dan *solidification* yang terjadi terhadap fluida air. Hal ini juga terkait dengan peristiwa perpindahan panas baik pelepasan maupun penyerapan panas yang terjadi pada kedua fenomena tersebut. Oleh karena itu penelitian yang akan dilakukan ini mencoba memodelkan bentuk yang berbeda dari cetakan es balok dengan menggunakan *software* komersial CFD untuk mendapatkan bentuk yang terbaik dalam perpindahan panas dan waktu pembekuan air di dalam cetakan.

### **1.2. Rumusan Masalah**

Rumusan Masalah pada penelitian ini adalah memodelkan fenomena *natural convection* dalam kondisi *steady* dan *solidification* dalam kondisi transien di dalam cetakan es balok berukuran 25 kg menggunakan *software* komersial CFD. Geometri pemodelan cetakan es ditampilkan secara dua dimensi (2D) yaitu bentuk bujur sangkar dan persegi panjang.

### **1.3. Batasan Masalah**

Proses pembekuan air di dalam cetakan es melibatkan proses *natural convection* dan *solidification* cukup kompleks. Permasalahan kondisi sebenarnya dari *boundary condition* dan geometri cetakan es membuat analisa *natural convection* dan *solidification* sulit untuk dianalisa. Penelitian ini mencoba menampilkan batasan masalah yang diharapkan memudahkan dalam analisa fenomena yang terjadi tanpa mengurangi tujuan yang ingin dicapai.

- a. Pemodelan dilakukan dengan dua dimensi (2D) yaitu dengan menggunakan geometri yang didapat dari cetakan es yang berada di permukaan atas benaman air garam.
- b. *Cavity* pada poin a disimplifikasi dengan menambahkan pengaruh gravitasi sehingga muncul fenomena dari *natural convection*.

- c. Perubahan densitas air karena perbedaan temperatur dari molekulnya menggunakan pendekatan Boussinesq dimana temperatur adalah fungsi densitas dan mengabaikan sifat anomali air.
- d. Properties untuk es (*solid*) sama dengan air (*liquid*) kecuali densitas awal ( $\rho_0$ ) dan konduktivitas termalnya.
- e. Simulasi dilakukan dengan *software* komersial CFD.

#### **1.4. Tujuan Penelitian**

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui fenomena *natural convection* dalam kondisi *steady* dan fenomena *solidification* dalam kondisi transien untuk cetakan es 25 kg dengan geometri bujur sangkar dan persegi panjang. Penelitian ini juga bertujuan untuk mendapatkan bentuk cetakan es yang terbaik dalam perpindahan panas dan waktu tercepat dalam pembekuan air.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian yang dilakukan adalah :

- a. Memberikan gambaran proses *natural convection* dan *solidification* dari fluida air di dalam cetakan es melalui pemodelan yang dilakukan.
- b. Memberikan pilihan alternatif geometri cetakan es yang paling tepat digunakan pada industri es balok untuk mendapatkan hasil penyerapan panas yang lebih besar dan proses pembekuan yang paling cepat.

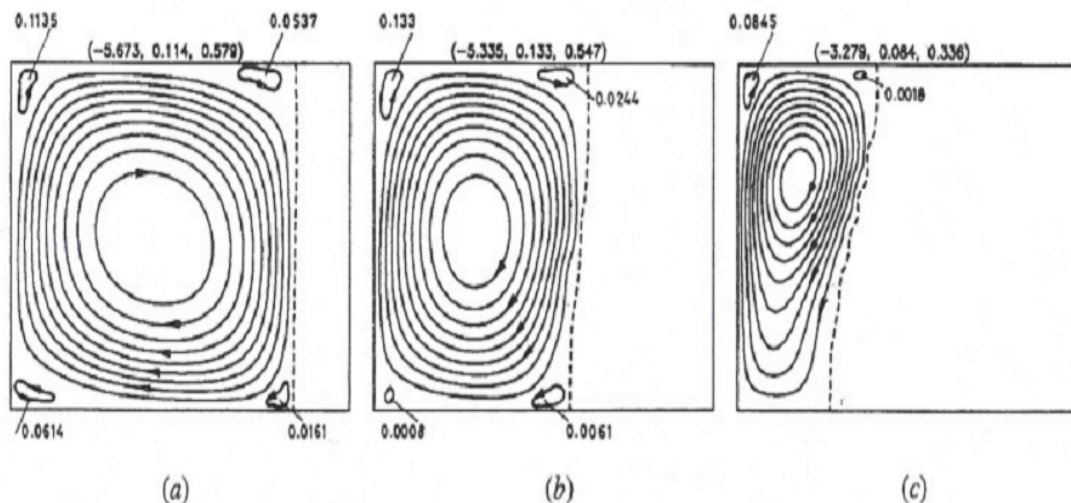


## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Penelitian Terdahulu

Rady dan Mohanty (1996), melakukan penelitian terhadap *natural convection* selama proses *melting* dan *solidification* logam murni di dalam *cavity*. Khusus untuk proses *solidification*, penelitian ini menampilkan simulasi numerik untuk timah cair. Rayleigh number untuk *solidification* ini adalah  $2,473 \times 10^5$ . *Cavity* memiliki aspek rasio  $y/x$  sebesar 0,75. *Cavity* untuk *cold wall* diatur dengan nilai temperatur di bawah titik beku dari timah cair.

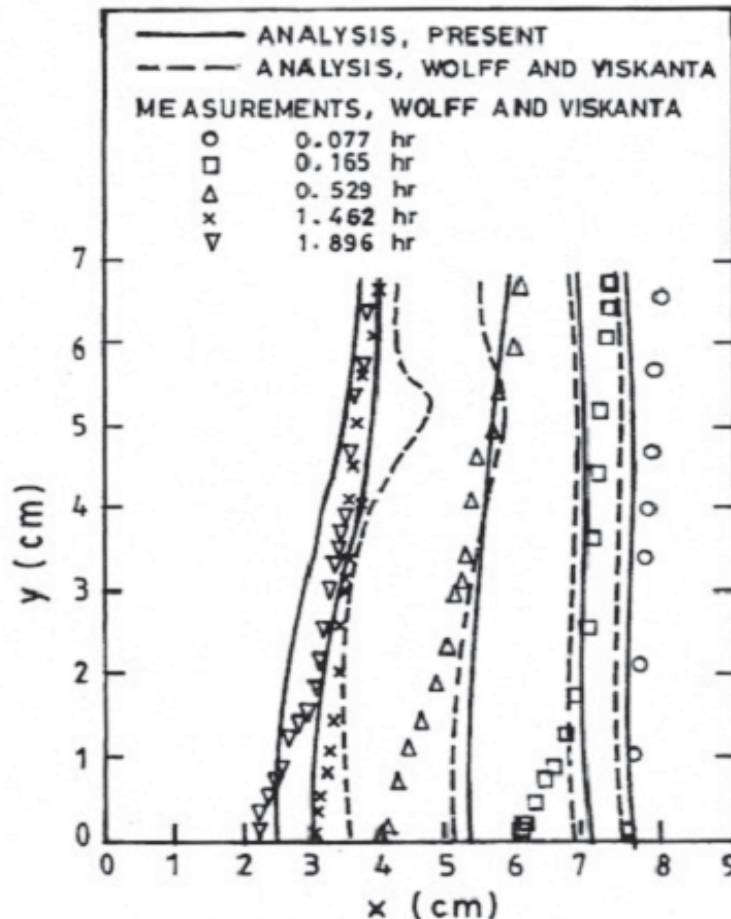


Gambar 2.1 *liquid solid interface* dan *streamline* proses *solidification* timah cair saat (a) 0,077 jam; (b) 0,529 jam; dan (c) 1,896 jam (Rady dan Mohanty, 1996)

Gambar 2.1 menunjukkan *streamline* yang berukuran besar searah dengan jarum jam menurun ukurannya selama *liquid solid interface* berkembang dari arah *cold wall*. *Streamline* kecil terlihat muncul di pojok dari *streamline* yang besar dan akan semakin menghilang setelah *solidification* berlangsung selama 1,896 jam.

Gambar 2.2 menunjukkan perbandingan prediksi *liquid solid interface* dari hasil simulasi numerik yang ditampilkan terhadap hasil simulasi dan data eksperimen dari Wolff dan Viskanta (1988). Pada saat 0,077 jam, kedua hasil simulasi dari penelitian ini dan Wolff dan Viskanta lebih cepat memprediksi lokasi *liquid solid interface* daripada data eksperimen. Perbedaan prediksi hasil

simulasi dan data eksperimen menjadi semakin kecil selama proses *solidification* berlangsung. Pada saat 1,462 jam, hasil simulasi yang ditampilkan bahkan dapat memprediksi secara akurat *liquid solid interface* di dekat *top cavity*.

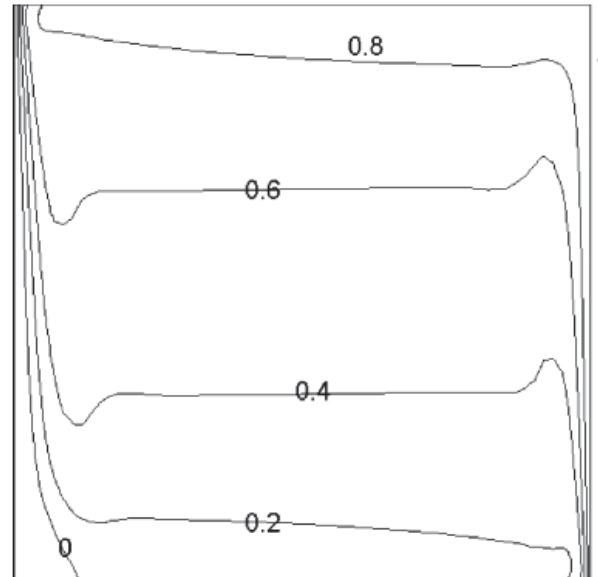


Gambar 2.2 Perkembangan *liquid solid interface* untuk proses *solidification* timah cair (Rady dan Mohanty, 1996; data numerik dan eksperimen Wolff dan Viskanta, 1988)

Vynnycky dan Kimura (2007), melakukan penelitian terhadap proses *natural convection* dan *solidification* di dalam *enclosure* bentuk persegi panjang. Tujuannya adalah membandingkan analisa perhitungan menggunakan pendekatan asimtotik dengan simulasi numerik proses perubahan fasa yang terjadi.

Simulasi numerik yang dilakukan hanya fokus pada pembekuan asam laurat di dalam *enclosure* dengan pendinginan dari arah *cold wall*. Temperatur dari *cold wall* mempunyai nilai di bawah dari titik beku asam laurat itu sendiri. Hubungan antara *cold wall* dan *hot wall* yang dihadirkan dalam penelitian ini adalah  $T_{melt} + 3 T_{hot} = 4 T_{melt}$ . Gambar 2.3 menunjukkan kontur isothermal dari temperatur *dimensionless* ( $\theta_s$ ) dengan *range* terendah 0 sampai 1 untuk *time*

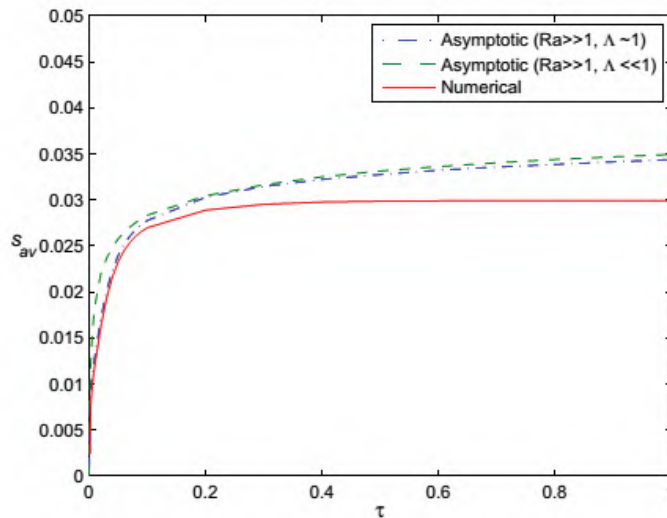
*dimensionless* ( $\tau$ ) bernilai 1 dan  $Ra = 10^7$ . *Liquid solid interface* terbentuk saat nilai  $\theta_s = 0$  yang berkembang dari *cold wall* (sisi depan) dengan ketebalan lapisan *solid* paling besar di dekat *bottom wall*. *Thermal boundary layer* terlihat di dekat *liquid solid interface* dan *hot wall*.



Gambar 2.3 Kontur isothermal temperatur *dimensionless* proses *solidification* asam laurat saat  $\tau = 1$  (Vynnycky dan Kimura, 2007)

Gambar 2.4 memperlihatkan perbandingan ketebalan rata-rata lapisan *solid* hasil perhitungan analisis dengan simulasi numerik. Grafik perhitungan analisis dengan  $Ra \gg 1$  dan  $\Lambda \sim 1$  adalah *liquid* diasumsikan kondisi *steady*. Sedangkan  $Ra \gg 1$  dan  $\Lambda \ll 1$  diasumsikan ketika *liquid* masih berkembang. Hasil simulasi numerik terlihat bagus dalam memprediksi ketebalan solid saat  $\tau$  kecil. Sedangkan untuk  $\tau$  yang besar hasil simulasi numerik jauh dari hasil yang didapatkan dari perhitungan analisis.

Yeoh, dkk. (1990) melakukan penelitian mengenai studi numerik tiga dimensi (3D) dari proses *natural convection* selama proses pembekuan air di dalam kubus dengan pendekatan *finite difference*. Tujuan dari penelitian tersebut adalah memprediksi posisi *solid liquid interface* dan pola aliran yang diperoleh selama proses pembekuan untuk Rayleigh number berkisar antara  $10^5 - 10^6$ .

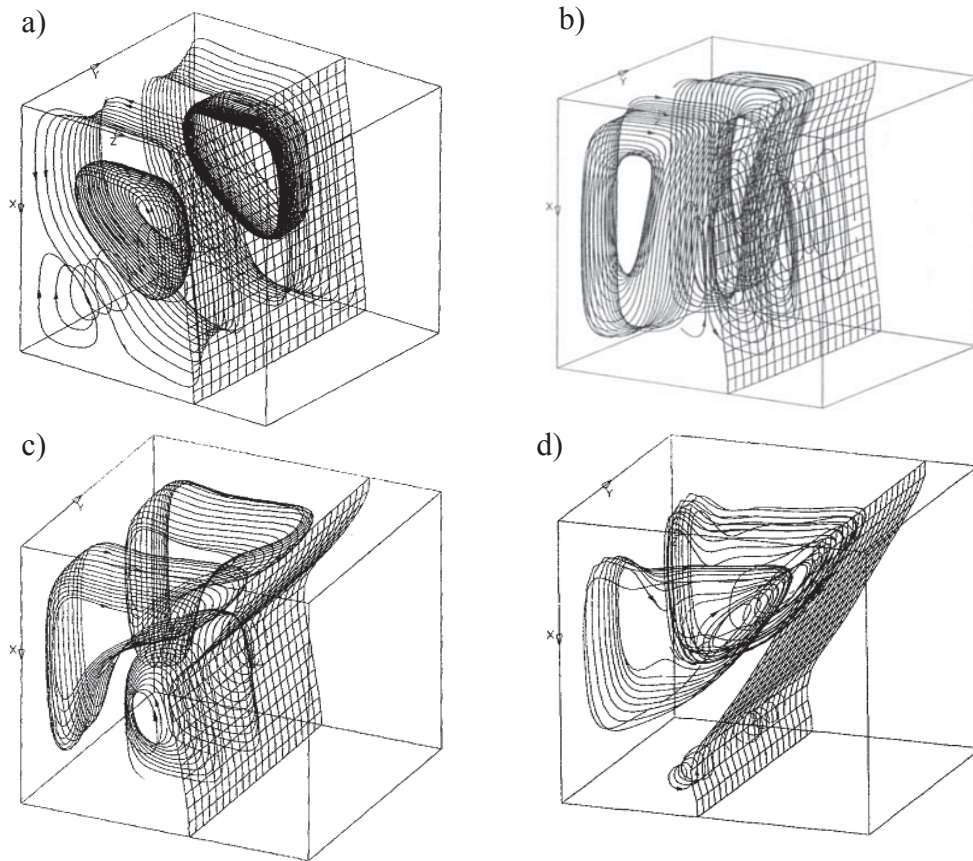


Gambar 2.4 Perbandingan ketebalan solid ( $s_{av}$ ) sebagai fungsi time *dimensionless* ( $\tau$ ) untuk  $Ra = 10^7$  (Vynnycky dan Kimura, 2007)

Skema pemodelan menggunakan *boundary condition* dengan 2 *vertical wall* paralel yang memiliki perbedaan temperatur. *Vertical wall* dengan temperatur  $T_c$  mempunyai nilai di bawah temperatur pembekuan dari *liquid*. *Vertical wall* yang lain memiliki temperatur  $T_h$  yang lebih besar dari temperatur *liquid*. Sedangkan *boundary condition* dari *wall* lainnya dalam kondisi adiabatik. Proses *natural convection* yang dihadirkan menggunakan metode polinomial dari beberapa properti air seperti densitas, viskositas dinamik, konduktivitas termal, dan panas spesifik. Metode ini untuk mendapatkan hasil yang akurat karena sifat anomali air pada temperatur  $4^\circ\text{C}$ .

Gambar 2.5 menunjukkan *liquid solid interface* dan pola aliran dari solusi numerik yang didapatkan pada  $t = 38,2$  menit. Gambar 2.5a adalah solusi dari *hot wall* dengan temperatur  $6^\circ\text{C}$  yang menunjukkan *liquid solid interface* dengan lekukan dari bentukan es yang paling tebal di dekat *top wall*. Hal ini dikarenakan densitas dari partikel air yang mendekati temperatur  $4^\circ\text{C}$  adalah densitas yang paling besar sehingga berada di posisi paling bawah dari *cavity* sedangkan dekat *top wall* adalah partikel dengan temperatur air mendekati titik bekunya. Pengaruh konveksi yang lebih kuat karena selisih temperatur yang lebih besar akan mendapatkan hasil yang berbeda dengan variasi  $T_h = 6^\circ\text{C}$ . Gambar 2.5d adalah hasil solusi perhitungan dengan nilai  $T_h = 15^\circ\text{C}$ . Es yang terbentuk dengan *liquid*

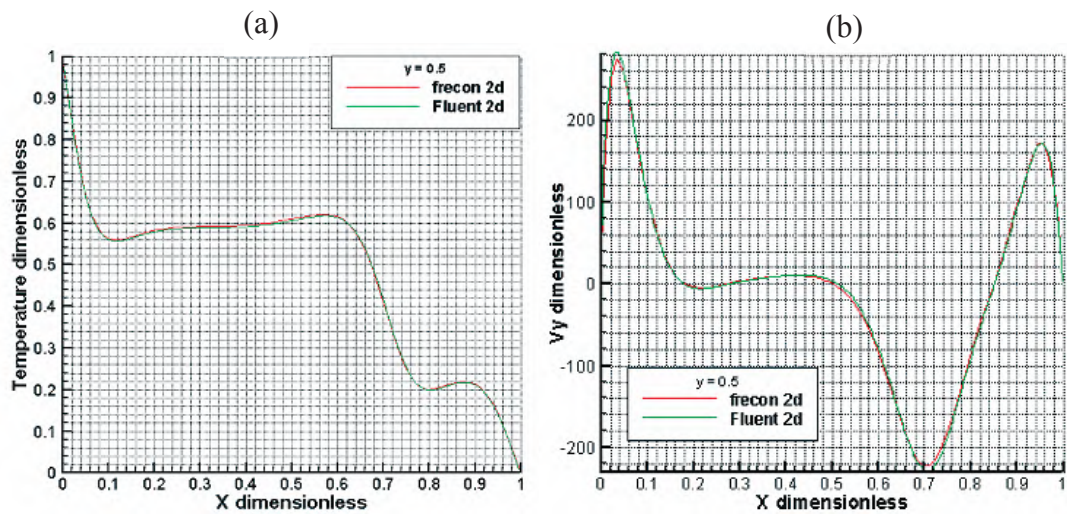
*solid interface* paling tebal justru berada di dekat *wall* paling bawah. Hal ini disebabkan temperatur aliran kurang berpengaruh terhadap perubahan densitas pada titik anomali air.



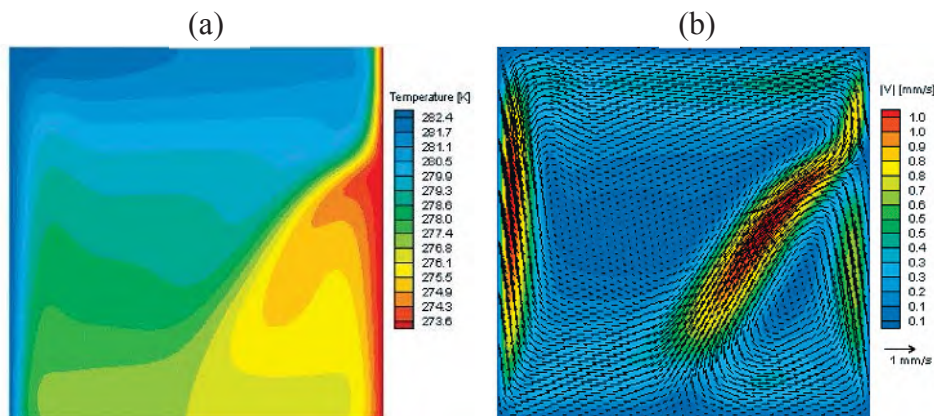
Gambar 2.5 Lokasi *liquid solid interface* dan aliran partikel pada  $t = 38,2$  menit untuk a)  $T_h = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ; b)  $T_h = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; c)  $T_h = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; dan d)  $T_h = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Yeoh, dkk., 1990)

Michalek dan Kowalewski (2003), melakukan simulasi numerik untuk proses pembekuan air. Kasus pertama dalam penelitian ini mencoba menampilkan kondisi *steady state natural convection* pada *cavity* yang memiliki perbedaan temperatur dimana kondisi temperaturnya mendekati titik beku dari air. Berdasarkan kondisi tersebut, kondisi anomali air diperhatikan dalam simulasi ini yaitu dengan menggunakan metode polinomial untuk densitasnya. Perbedaan temperatur kedua *vertical wall* adalah 10 K dengan nilai Rayleigh number ( $Ra_H$ ) =  $2,52 \times 10^6$ . Tujuan dari simulasi kasus pertama ini adalah membandingkan hasil solusi dari perangkat lunak CFD FLUENT code dan FRECON3V *finite difference code*.





Gambar 2.6 (a) Grafik profil temperatur *dimensionless*; (b) Grafik profil kecepatan *dimensionless* arah y kondisi *steady* pada *horizontal mid plane* (Michalek dan Kowalewski, 2003)



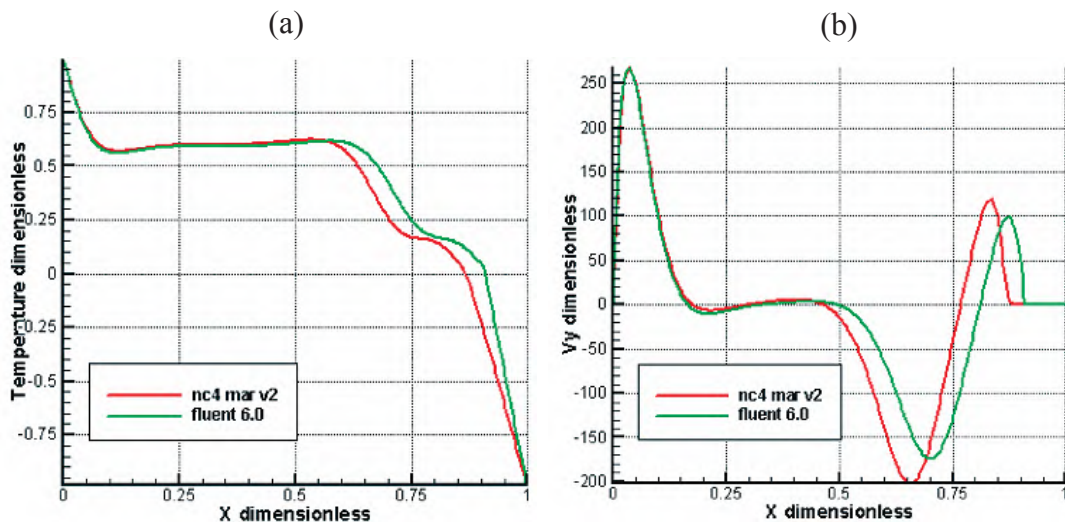
Gambar 2.7 (a) Kontur temperatur; (b) Kontur dan vektor kecepatan *magnitude* kondisi *steady* (Michalek dan Kowalewski, 2003)

Gambar 2.6 menunjukkan perbandingan profil temperatur dan kecepatan antara hasil simulasi FLUENT *finite volume code* dan FRECON3V *finite difference code* memiliki perbedaan yang sangat kecil. Perbedaan untuk kedua hasil tersebut di bawah 3 %

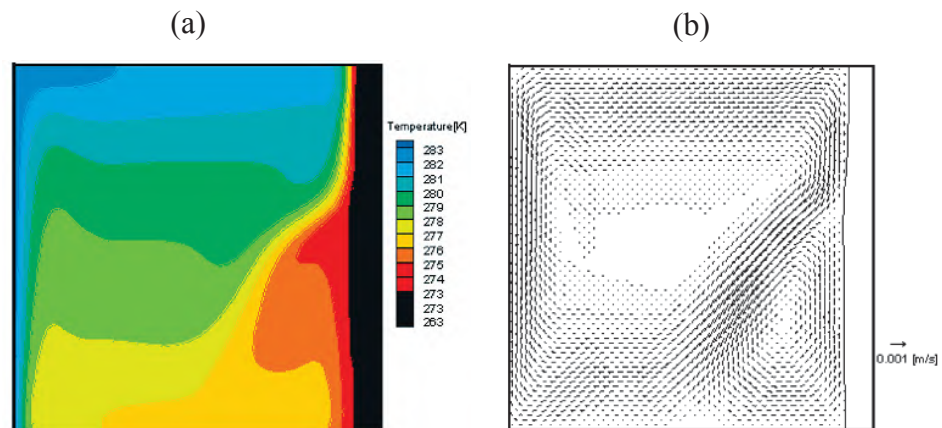
Gambar 2.7a memperlihatkan kontur temperatur dari *natural convection* dari perbedaan temperatur kedua *vertical wall*-nya. Kontur yang tidak simetrik tampak pada sisi dekat *cold wall*. Hal ini juga tampak pada gambar 2.7b yang menunjukkan 2 daerah aliran dimana daerah aliran kecil tampak di dekat *cold wall*. Kedua hal tersebut adalah pengaruh dari anomali air dengan nilai densitas tertinggi pada temperatur 4°C.



Kasus kedua adalah menampilkan simulasi *solidification* yang menggunakan hasil solusi temperatur dan kecepatan yang didapat dari simulasi kasus pertama sebagai *initial condition*. *Boundary condition* hanya diubah pada sisi *cold wall* yang semula memiliki temperatur 273 K diganti menjadi 265 K untuk mendapatkan pembekuan air dari satu sisi. Pada kasus ini juga bertujuan untuk membandingkan hasil simulasi dari FLUENT *finite volume code* dengan NC4MARV2 2D *finite volume university code*.



Gambar 2.8 (a) Grafik profil temperatur *dimensionless*; (b) Grafik profil kecepatan arah y *dimensionless* pada *horizontal mid plane* pada  $t = 100$  s (Michalek dan Kowalewski, 2003)

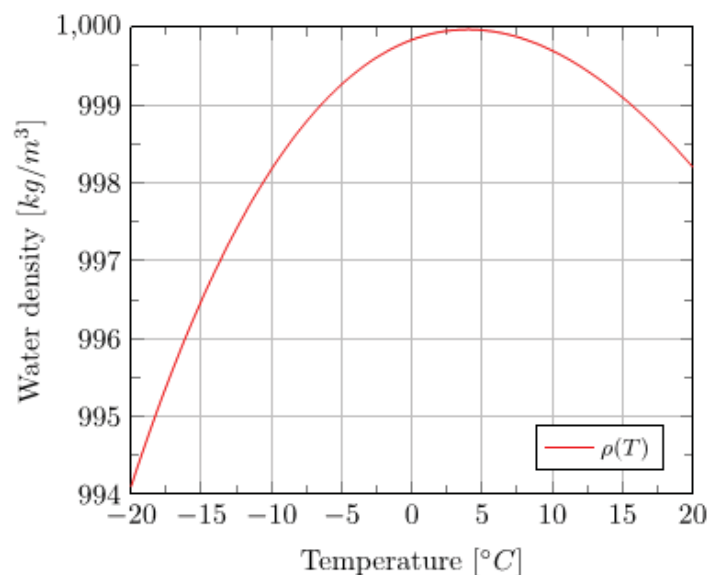


Gambar 2.9 (a) Kontur temperatur; (b) vektor kecepatan *magnitude* pada  $t = 100$  s (Michalek dan Kowalewski, 2003)

Gambar 2.9 memperlihatkan proses solidification pada  $t = 100$  s. Arah *interface solid* dari arah *cold wall* dengan ketebalan lapisan es cenderung datar dari *bottom wall* sampai ke *top wall*. Sementara aliran yang bisa dilihat pada

vektor kecepatan *magnitude* juga masih membentuk pola yang sama seperti kondisi *steady natural convection* dengan kecepatan maksimal 1 mm/s. Sementara untuk perbandingan hasil simulasi yang dilakukan menggunakan FLUENT *finite volume code* dan NC4MARV2 2D *finite volume university code* masih menunjukkan pola yang hampir sama walaupun masih jauh perbedaan nilai yang didapatkan dari kedua hasil simulasi tersebut. Hal ini diperlihatkan pada grafik kecepatan gambar 2.8b yang menunjukkan prediksi ketebalan es pada *horizontal mid plane* untuk NC4MARV2 lebih tebal jika dibandingkan dengan FLUENT.

Bourdillon, dkk (2015) melakukan simulasi numerik proses pembekuan air di dalam *cavity* menggunakan *open source CFD code* OpenFOAM. Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan hasil simulasi OpenFOAM dengan komersial CFD FLUENT *finite volume code*. Simulasi yang dilakukan adalah 2D dengan aliran laminar karena nilai Rayleigh *number* adalah  $2,52 \times 10^6$ . Penggunaan 4 order polinomial untuk memodelkan variasi densitas air untuk menggambarkan sifat anomalnya adalah sebagai berikut:



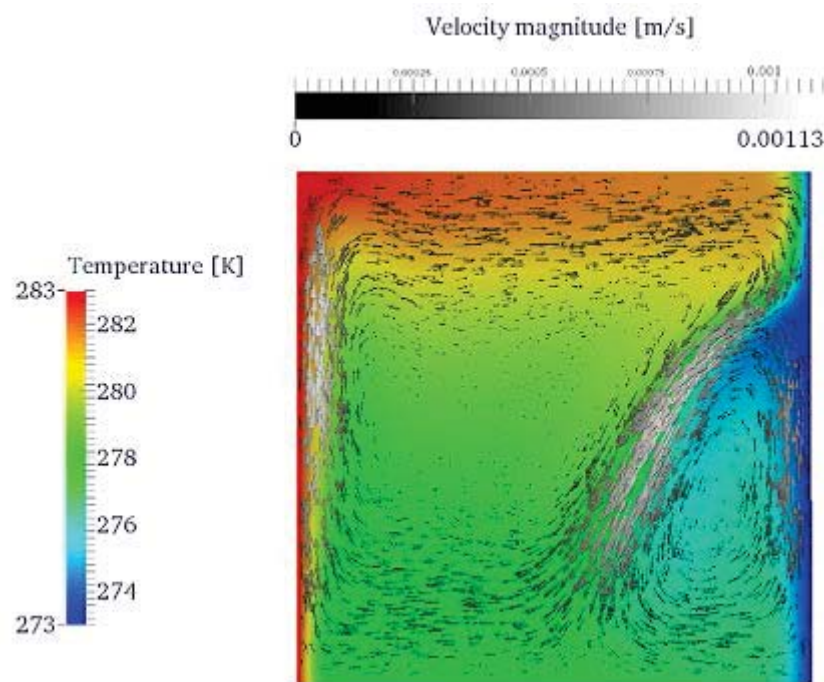
Gambar 2.10 Variasi densitas air sebagai fungsi dari temperatur dengan batas dari -20°C sampai 20°C (Bourdillon, dkk., 2015)

Gambar 2.10 adalah grafik hasil dari plotting persamaan 2.1 dimana densitas dari air meningkat saat temperaturnya menurun dari temperatur 20°C sampai 4°C. Sebaliknya jika temperatur menurun dari 4°C samapai -20°C

densitasnya akan menurun. Nilai maksimal densitas berada saat air bertemperatur 4°C yaitu sebesar 999,8 kg/m<sup>3</sup>.

$$\rho(T) = 999,840281167108 + 0,0673268037314653 \times T - 0,00894484552601798 \times T^2 + 8,78462866500416 \cdot 10^{-5} \times T^3 - 6,62139792627547 \cdot 10^{-7} \times T^4 \quad (2.1)$$

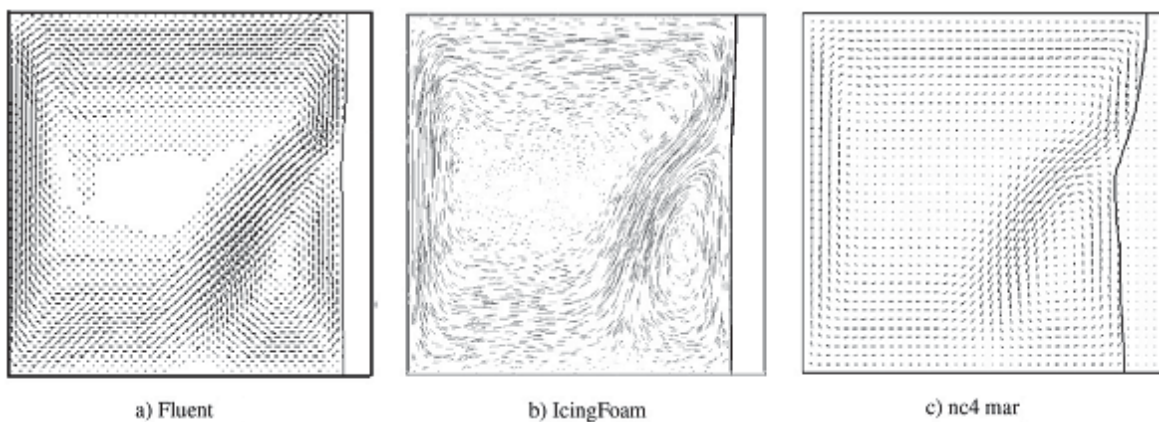
Kondisi *steady natural convection* hasil simulasi numerik ditunjukkan pada gambar 2.11 dengan selisih temperatur kedua *vertical wall*-nya adalah 10°C. Daerah resirkulasi aliran terbagi menjadi 2 bagian dengan kecepatan *magnitude* maksimal 0,00113 m/s. Resirkulasi terkecil di daerah dekat *cold wall* dengan arah aliran berlawanan dengan arah jarum jam. Sedangkan resirkulasi aliran terbesar memiliki arah aliran searah dengan jarum jam.



Gambar 2.11 Kontur temperatur dan vektor kecepatan *magnitude* dari kondisi *steady natural convection* hasil simulasi OpenFOAM (Bourdillon, dkk., 2015)

Simulasi numerik untuk proses *solidification* sama halnya dengan penelitian yang dilakukan oleh Michalek dan Kowalewski (2003), kondisi temperatur dan kecepatan dari hasil simulasi kondisi *steady natural convection* dijadikan sebagai *initial condition*. Gambar 2.12 menunjukkan prediksi *liquid-*

*solid interface* dan pola aliran konveksi dari hasil simulasi FLUENT, NC4MARV2, dan OpenFOAM. Hasil simulasi dari OpenFOAM jika dibandingkan dengan FLUENT menunjukkan prediksi yang hampir sama mengenai ketebalan lapisan es yang terbentuk dari arah *cold wall*. Lapisan ketebalan es yang cenderung datar dari *bottom wall* sampai ke *top wall* didapatkan setelah terjadi pendinginan selama 100 s. Hal yang berbeda ditunjukkan oleh hasil simulasi NC4MARV2 yang memperlihatkan ketebalan lapisan es di dekat *bottom wall* cenderung lebih tebal jika dibandingkan yang di dekat *top wall*.

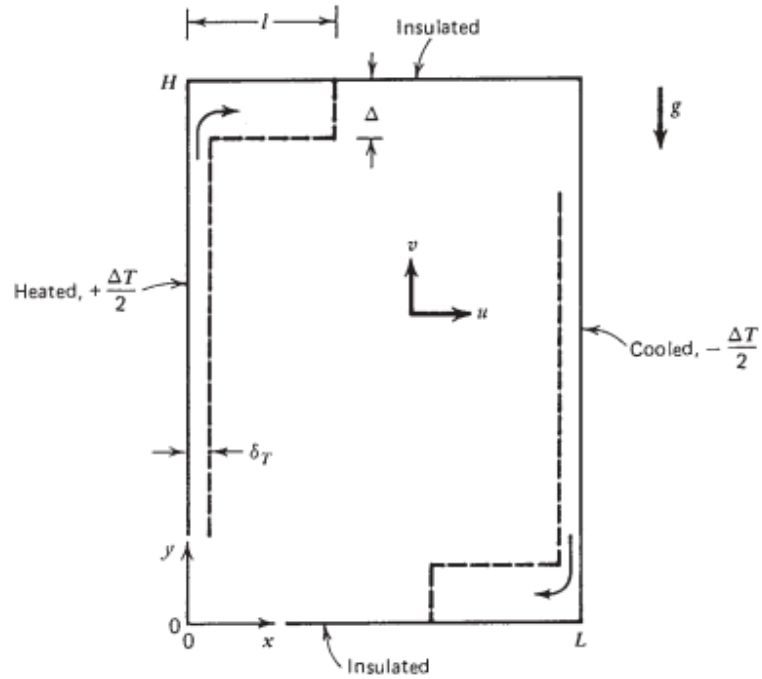


Gambar 2.12 *Liquid-solid interface* dan vektor kecepatan *magnitude* hasil simulasi simulasi FLUENT, OpenFOAM , dan NC4MARV2 pada  $t = 100$  s (Bourdillon, dkk., 2015)

## 2.2. Dasar Teori

### 2.2.1. *Natural Convection* Pemanasan dari Samping

Berdasarkan bentuk *enclosure* dua dimensi (2D) dengan ketinggian (H) dan panjang horizontal (L) yang ditunjukkan gambar 2.13. *Enclosure* tersebut diisi dengan fluida Newtonian seperti udara atau air untuk mendapatkan fenomena *natural convection*. Temperatur pemanasan dari sisi *hot wall* dan pendinginan dari sisi *cold wall* dengan temperatur  $+\Delta T/2$  dan  $-\Delta T/2$ . *Top* dan *bottom wall* diinsulasi untuk eksperimen ini. *Initial condition* untuk fluida di dalam *enclosure* adalah *isothermal* dengan tidak ada pergerakan untuk kecepatan arah x dan y ( $u = v = 0$ ).



Gambar 2.13 *Enclosure* persegi panjang dua dimensi dengan *isothermal sidewall* (Bejan, 2013)

Persamaan dasar yang menggambarkan aliran fluida 2D akibat adanya *natural convection* terdiri dari persamaan konservasi massa, momentum arah  $x$ , momentum arah  $y$ , dan energi dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_0 u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_0 v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.3)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_0 u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho_0 v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g[\rho(T) - \rho_0] \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \Delta T \quad (2.5)$$

Persamaan 2.2-2.5 adalah pemodelan fluida sebagai *Boussinesq-incompressible* dimana  $\rho_0$  adalah konstan kecuali  $\rho(T)$  pada persamaan momentum arah  $y$  dimana

$$\rho(T) = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (2.6)$$

Variabel dimensionless untuk *Rayleigh number* ( $Ra_H$ ), *Prandtl number* ( $Pr$ ), temperatur *dimensionless* ( $\theta$ ), koordinat vertikal ( $y$ ) dan horizontal ( $x$ ), kecepatan

vertikal (v) dan horizontal (u) dan waktu *dimensionless* ( $\tau$ ) dapat dituliskan sebagai berikut

$$Ra_H = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}, Pr = \frac{\alpha}{\nu}$$

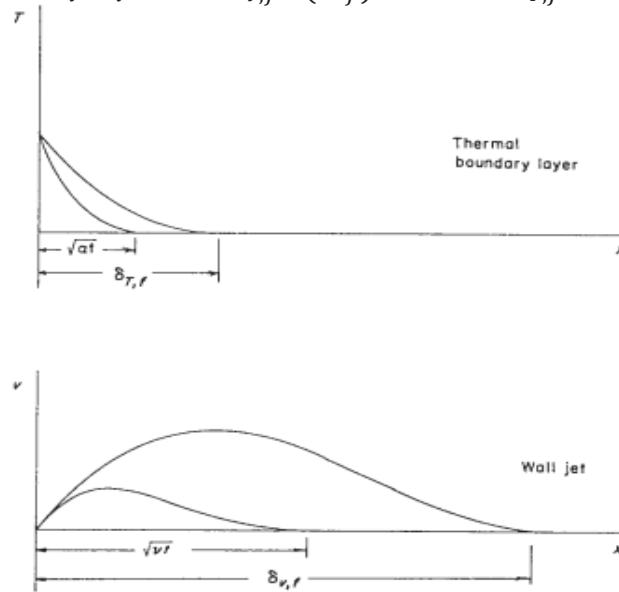
$$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}, Y = \frac{y}{H}, X = \frac{x}{L}, V = \frac{vH}{\alpha}, U = \frac{uL}{\alpha}, \tau = \frac{t\alpha}{H^2} \quad (2.7)$$

### 2.2.1.1. Kriteria Berdasarkan *Vertical Layer*

Persamaan ketebalan *thermal boundary layer* dan *velocity boundary layer* untuk *natural convection* di dalam *enclosure* dituliskan pada persamaan 2.8 dan 2.9 berikut ini.

$$\text{Thermal boundary layer} \quad \delta_{T,f} \sim (\alpha t_f)^{1/2} \sim H Ra_H^{-1/4} \quad (2.8)$$

$$\text{Velocity boundary layer} \quad \delta_{v,f} \sim (\nu t_f)^{1/2} \sim Pr^{1/2} \delta_{T,f} \quad (2.9)$$



Gambar 2.14 Perkembangan dua struktur *layer* dekat *hot wall* (Bejan, 2013)

Gambar 2.14 menunjukkan kriteria *vertical layer natural convection* di dalam *enclosure*. *Thermal boundary layer* ( $\delta_{T,f}$ ) dan *velocity boundary layer* ( $\delta_{v,f}$ ) lebih besar jika dibandingkan dengan batasan *boundary layer* konduksinya. Kriteria *thermal boundary layer* dan *wall jet* harus memenuhi kriteria pertidaksamaan 2.10 dan 2.11 berikut ini.



$$\frac{H}{L} < Ra_H^{1/4} \quad (2.10)$$

$$\frac{H}{L} < Ra_H^{1/4} Pr^{-1/2} \quad (2.11)$$

#### 2.2.1.2. Kriteria Berdasarkan Horizontal Jet

Empat *regime* perpindahan panas untuk *natural convection* di dalam *enclosure* berdasarkan profil temperatur horizontal pada *wall layer* yang ditunjukkan gambar 2.15 adalah sebagai berikut:

a. *Regime I: conduction limit*

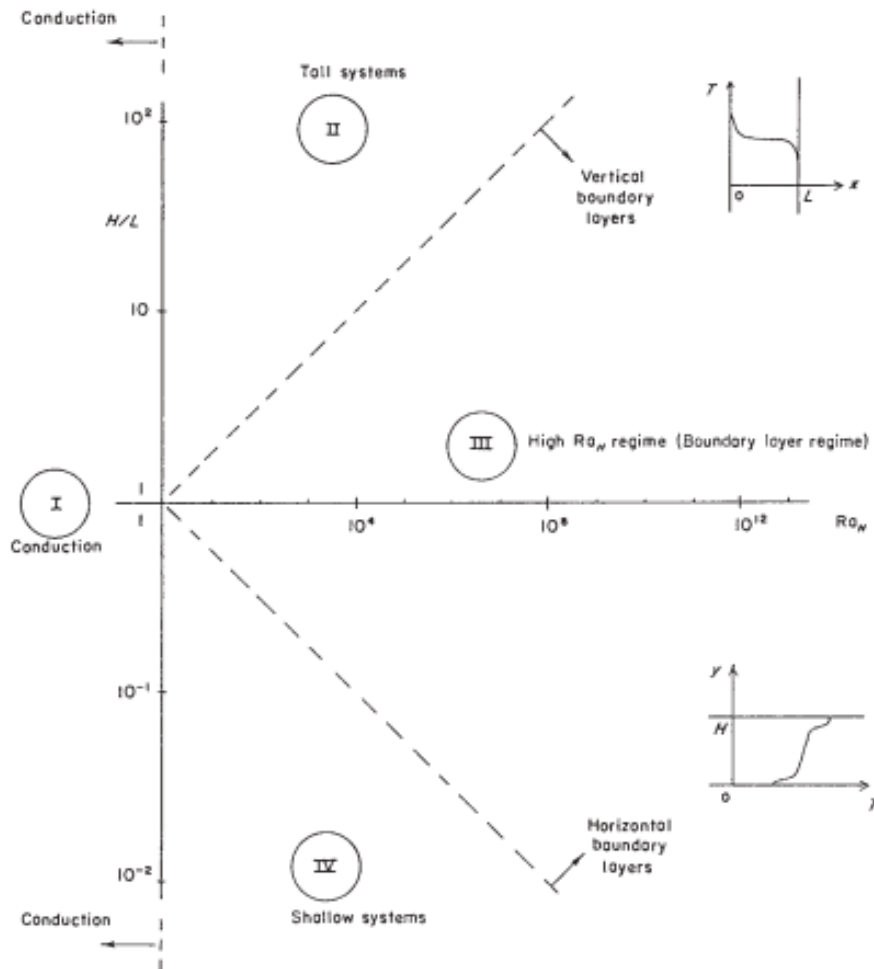
Temperatur bervariasi secara linier di dalam *cavity*. Oleh karena itu, nilai perpindahan panas diantara dua *sidewall* berorder  $(kH\Delta T)/L$ . Horizontal gradien temperatur  $\Delta T/L$  mengakibatkan melambatnya sirkulasi aliran fluida searah jarum jam. Namun, kontribusi perpindahan panas dari aliran ini tidak signifikan.

b. *Regime II: tall enclosure limit*

Sebagian besar *tall enclosure*, temperatur bervariasi secara linier di dalam *cavity*. Oleh karena itu, nilai perpindahan panas diantara dua *sidewall* berorder  $(kH\Delta T)/L$  seperti pada *regime I*. Sirkulasi aliran searah jarum jam, pola aliran ditandai dengan lapisan yang berbeda di sekitar dinding bagian atas dan bawah.

c. *Regime III: high- $Ra_H$  limit (boundary layer regime)*

*Vertical thermal boundary layer* tampak jelas sepanjang dinding vertikal dari *cavity*. Nilai perpindahan panas di dalam *cavity* mempunyai skala  $(k/\delta_{T,f})H\Delta T$ . *Thermal layer* tampak disepanjang *adiabatic horizontal wall*. Sebagian besar *core* aliran fluida relatif stagnan dan mempunyai tingkatan termal.



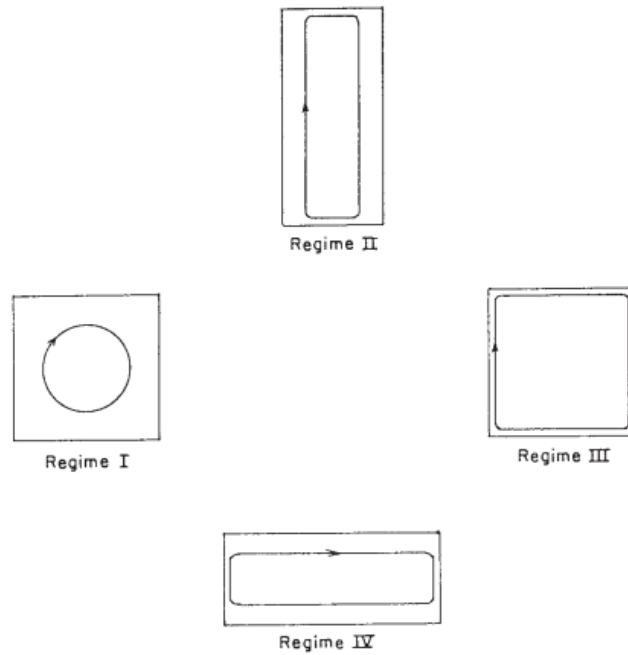
Gambar 2.15 Empat *regime* perpindahan panas untuk *natural convection* di dalam *enclosure* pemanasan dari samping (Bejan, 2013)

d. *Regime IV: shallow enclosure limit*

Mekanisme perpindahan panas didominasi oleh *vertical thermal layer*. Oleh karena itu, nilai perpindahan panas di dalam *cavity* mempunyai skala  $(k/\delta_{T,f})H\Delta T$ . Skala ini merupakan batas atas karena pengaruh insulasi sepanjang *horizontal core* di dalam *cavity*.

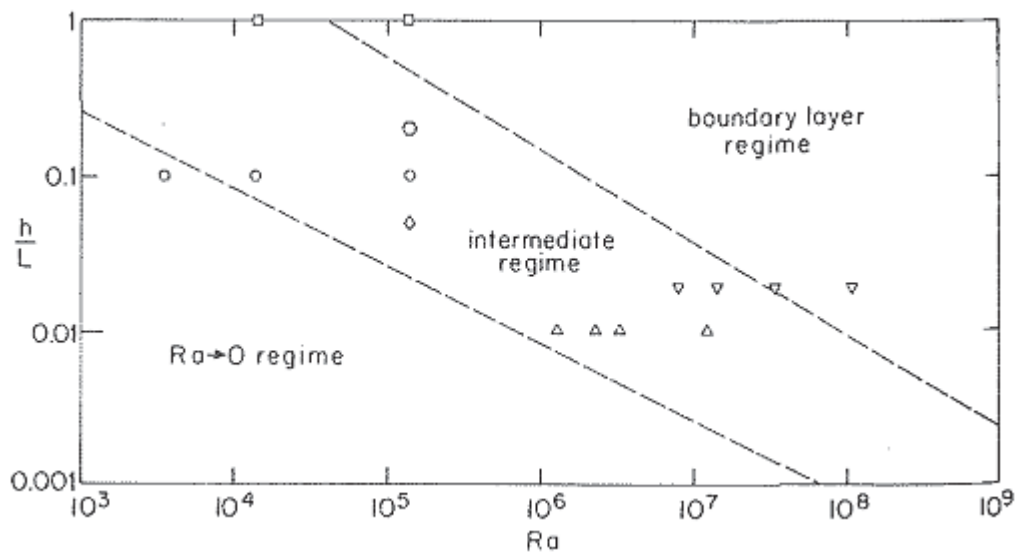
Perbedaan sirkulasi pola aliran yang dibentuk oleh keempat *regime* di atas ditunjukkan oleh gambar 2.16 di bawah ini.





Gambar 2.16 Pola sirkulasi aliran fluida berdasarkan keempat *regime* (Bejan, 2013)

### 2.2.1.3. Nusselt *number* untuk kriteria *boundary layer regime*



Gambar 2.17 Tiga *regime* untuk laminar *natural convection* pada *shallow enclosure* ( $H/L < 1$ ) (Bejan dan Tien, 1978)

Bejan dan Tien (1978), memberikan korelasi Nusselt *number* teoritis dari ketiga laminar *regime* pada *shallow enclosure* ( $H/L < 1$ ) yang ditunjukkan gambar 2.17. Persamaan secara umum untuk ketiga *regime* tersebut dijadikan satu yang penting dalam perhitungan aplikasi teknik. Mereka mencoba membuat persamaan

Nusselt number dari *regime*  $Ra \rightarrow 0$  ke dalam *boundary layer limit*. Korelasi kedua persamaan Nu tersebut ditunjukkan pada persamaan 2.12 berikut ini.

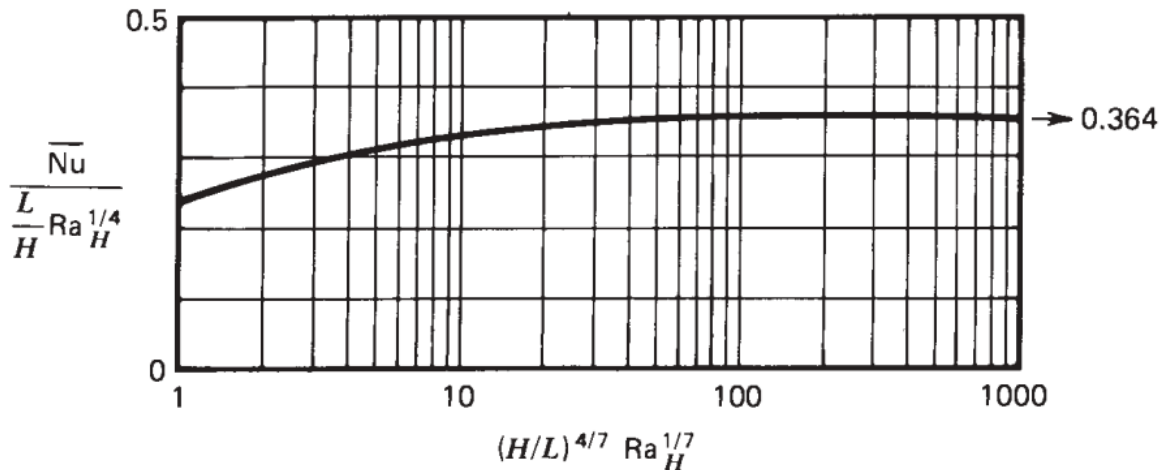
$$\overline{Nu} = 1 + \left\{ \left[ \frac{(Ra h/L)^2}{362880} \right]^{-0,386} + \left( 0,623 Ra_H^{1/5} \frac{L}{H} \right)^{-0,386} \right\}^{1/-0,386} \quad (2.12)$$

Catton (1978), memberikan persamaan  $\overline{Nu}$  dari *natural convection* di dalam *cavity* dengan aspek rasio  $1 \lesssim H/L \lesssim 10$ . Persamaan 2.13 hanya digunakan untuk aspek rasio  $1 \lesssim H/L \lesssim 2$ . Persamaan tersebut mempunyai batasan untuk Prandtl number (Pr) yaitu pada  $10^{-3} \lesssim Pr \lesssim 10^5$ . Selain hal tersebut, persamaan 2.13 valid untuk  $10^3 \lesssim \frac{Ra Pr}{0,2+Pr}$ .

$$\overline{Nu} = 0,18 \left( \frac{Pr}{0,2 + Pr} Ra \right)^{0,29} \quad (2.13)$$

Bejan (1978), memberikan persamaan untuk  $\overline{Nu}$  dari *boundary layer regime* dengan batasan  $Ra^{1/7} H/L \rightarrow \infty$ . Konstanta yang valid digunakan untuk persamaan 2.13 adalah dengan  $(H/L)^{4/7} Ra_H^{1/7} > 100$  ditunjukkan pada gambar 2.18.

$$\overline{Nu} = 0,364 \frac{L}{H} (Ra_H)^{1/4} \quad (2.14)$$



Gambar 2.18  $\overline{Nu}$  dari *boundary layer regime* dengan batasan  $Ra^{1/7} H/L \rightarrow \infty$  (Bejan, 2013; data diperoleh dari Gill, 1966)

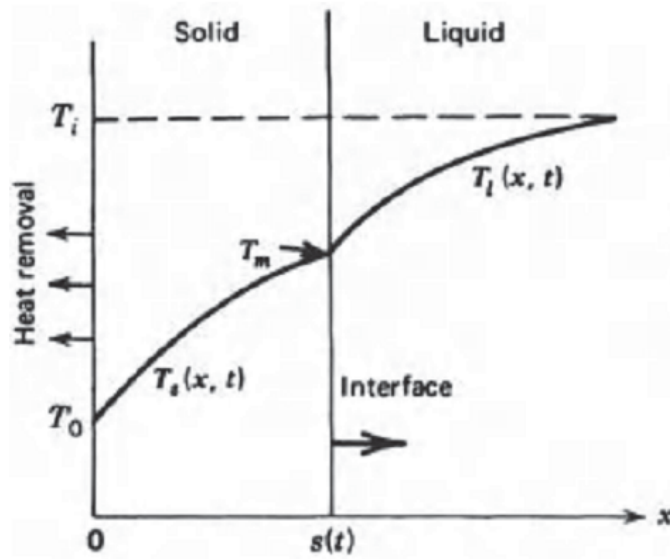
Nilai perpindahan panas *overall* yang melalui enclosure dituliskan sebagai berikut:

$$q' = k \int_{-H/2}^{H/2} \left( -\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} dy = 0,364 k \Delta T Ra_H^{1/4} \quad (2.15)$$

### 2.2.2. Solidification

Kasus perpindahan panas transien yang melibatkan *melting* atau *solidification* umumnya sering disebut sebagai kasus perubahan fasa atau pergerakan *boundary*. Kasus ini merupakan hal yang penting dalam banyak aplikasi teknik seperti pembuatan es, pembekuan makanan, pemadatan logam di cetakan, penyimpanan energi termal, pengolahan bahan kimia dan plastik, pertumbuhan kristal, ablasi aerodinamis, pengelasan logam dan paduannya, dan banyak lagi yang lainnya. Solusi dari permasalahan perubahan fasa ini secara inheren sulit karena *interface* diantara fasa *solid* dan *liquid* bergerak sebagai panas laten yang diserap atau dilepas pada *interface* tersebut. Sebagai hasilnya, lokasi *liquid solid interface* tidak diketahui sebagai *priori* dan harus mengikuti sebagai bagian dari solusi. Di dalam proses *solidification* seperti air, prosesnya berlangsung pada temperatur khusus dan fasa *solid* dan *liquid*-nya dipisahkan secara jelas oleh *interface* yang bergerak.

Gambar 2.19 menunjukkan kasus *solidification* 1 dimensi. *Liquid* mempunyai perubahan fasa tunggal dengan temperatur *melting*  $\equiv$  temperatur *freezing* ( $T_m$ ) terbatas untuk daerah *semi infinite*  $0 < x < \infty$ . Awalnya, *liquid* tersebut dengan temperatur seragam ( $T_i$ ) yang lebih tinggi nilainya daripada temperatur perubahan fasa ( $T_m$ ). Pada saat  $t = 0$ , temperatur permukaan *boundary* ( $x = 0$ ) bertemperatur  $T_0$  yang nilainya lebih kecil dari pada  $T_m$  dan dipertahankan saat  $t > 0$ . Proses *solidification* mulai terjadi pada permukaan batas  $x = 0$ , dan *liquid solid interface* bergerak dalam arah  $x$  positif.



Gambar 2.19 Pergerakan permukaan *boundary* untuk proses *solidification* 1 dimensi (Ozisk dan David, 2012)

Sebuah metode *fixed grid-enthalpy* digunakan untuk mensimulasikan proses *solidification*. Metode ini menggunakan persamaan konservasi dan *boundary condition* untuk seluruh domain. Kondisi *liquid solid interface* dihitung untuk *source term* yang cocok di dalam persamaan. Total kandungan panas (*enthalpy*) dan fungsi *liquid fraction* harus didefinisikan sebagai persamaan khusus. *Liquid fraction* merupakan fungsi dari temperatur bervariasi nilainya dari 0 sampai 1 dan mendefinisikan rasio volumetrik fasa *liquid* dalam sel komputasi adalah sebagai berikut:

$$f_l = \begin{cases} 0 & \text{Jika } T < T_s & \text{Liquid} \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{Jika } T_s < T < T_l & \text{Liquid solid interface} \\ 1 & \text{Jika } T_l < T & \text{Solid} \end{cases} \quad (2.16)$$

Menggunakan definisi *liquid fraction* ( $f_l$ ), total kandungan panas dalam fluida atau *enthalpy* sebagai fungsi  $h(T)$  dapat didefinisikan sebagai:

$$h(T) = \int_{T_{ref}}^T C_p dT + f_l \lambda \quad (2.17)$$

Pada persamaan 2.15,  $\lambda$  menunjukkan panas laten yang diperlukan untuk perubahan fasa. Persamaan energi, konservasi massa, momentum arah x dan y dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\rho_0 \left[ \frac{\partial}{\partial t} (C_p T) + u \frac{\partial}{\partial x} (C_p T) + v \frac{\partial}{\partial y} (C_p T) \right] = k \Delta T - \rho_0 \lambda \frac{\partial f_l}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.19)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_0 u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_0 v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial x} + v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_u \quad (2.20)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_0 u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho_0 v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial y} + v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g[\rho(T) - \rho_0] + S_v \quad (2.21)$$

Dimana komponen kecepatan, densitas, konduktivitas termal, viskositas, dan panas spesifik dihadirkan untuk kombinasi linier yang tepat dalam *fasa solid* dan *liquid*. Persamaan linier tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u = f_l u_l + (1 - f_l) u_s \quad (2.22)$$

$$v = f_l v_l + (1 - f_l) v_s \quad (2.23)$$

$$C_p = f_l C_{pl} + (1 - f_l) C_{ps} \quad (2.24)$$

$$k = f_l k_l + (1 - f_l) k_s \quad (2.25)$$

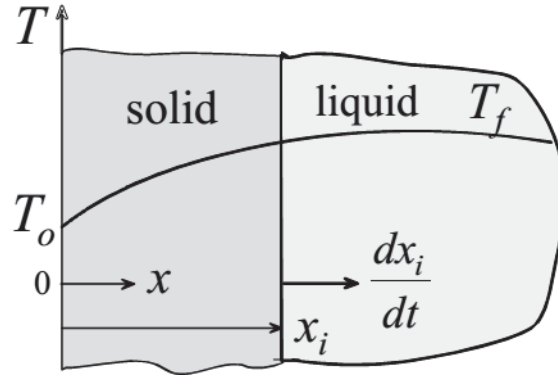
*Source term* di sebelah sisi kanan persamaan momentum arah x (2.19) dan momentum arah y (2.20) dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut:

$$S_u = -C \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^3 + 0,001} u \quad (2.26)$$

$$S_v = -C \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^3 + 0,001} v \quad (2.27)$$

Persamaan 2.22 dan 2.23 menggambarkan sebuah implementasi hukum Darcy untuk aliran dalam poros medium. Satu hal yang perlu diperhatikan, untuk temperatur lebih besar daripada  $T_l$ , kedua *source term* diabaikan dan persamaan digambarkan sebagai aliran fluida murni. Ketika temperatur lokal kurang daripada  $T_s$ , *source term* menjadi dominan ( $C = 10^8$ ) sehingga tidak ada kecepatan fluida pada fasa *solid*. Sedangkan untuk temperatur lokal diantara  $T_l$  dan  $T_s$ , aliran di poros medium disebut sebagai *mushy zone*.

Solusi Stefan adalah salah satu solusi eksak untuk kasus perubahan fasa. Gambar 2.20 menunjukkan proses *solidification* pada area *semi infinite liquid*. *Liquid* awalnya memiliki temperatur fusi ( $T_f$ ). Permukaan pada  $x = 0$  dimana temperatur permukaan ( $T_0$ ) <  $T_f$ . Proses *solidification* dimulai pada  $x = 0$ .



Gambar 2.20 Proses *solidification* pada area *semi infinite liquid* (Jiji, 2009)

Stefan *number* didefinisikan sebagai panas sensibel ( $C_{ps}$ ) dibanding dengan panas laten ( $\mathcal{L}$ ) ditunjukkan pada persamaan 2.23.

$$Ste = \frac{C_{ps}(T_f - T_0)}{\mathcal{L}} \quad (2.28)$$

*Error function* ( $\lambda$ ) untuk *Ste number* kecil didefinisikan sebagai

$$\lambda = \sqrt{\frac{C_{ps}(T_f - T_0)}{2\mathcal{L}}} \quad (2.29)$$

Sedangkan tebal fasa *solid* untuk  $t > 0$  adalah

$$x_i = \lambda \sqrt{4\alpha_s t} \quad (2.30)$$

Substitusi persamaan 2.25 ke dalam persamaan 2.26 didapatkan persamaan  $x_i$  baru sebagai berikut:

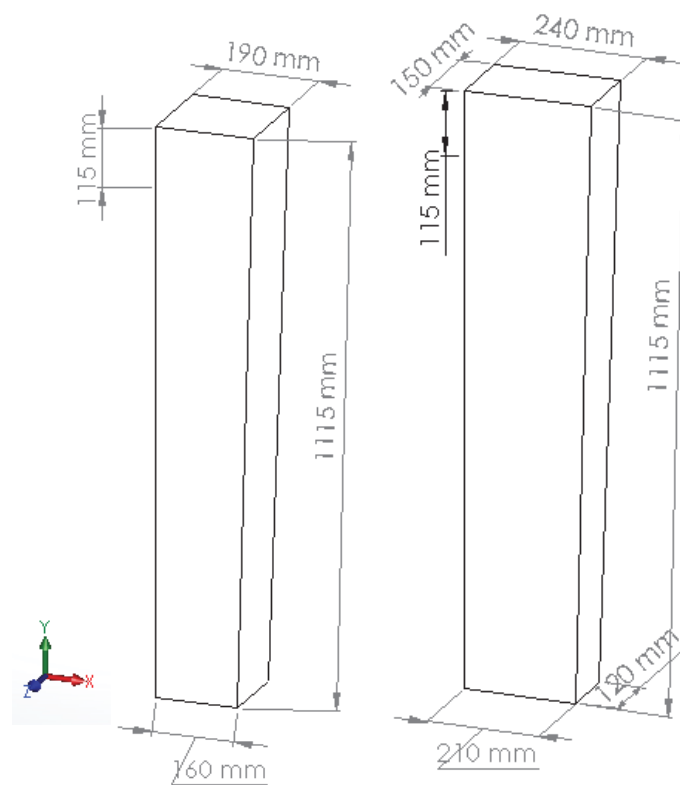
$$x_i = \sqrt{\frac{2k_s(T_f - T_0)}{\rho_s \mathcal{L}}} t \quad (2.31)$$

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1. Bentuk Cetakan Es dan Geometri Pemodelan

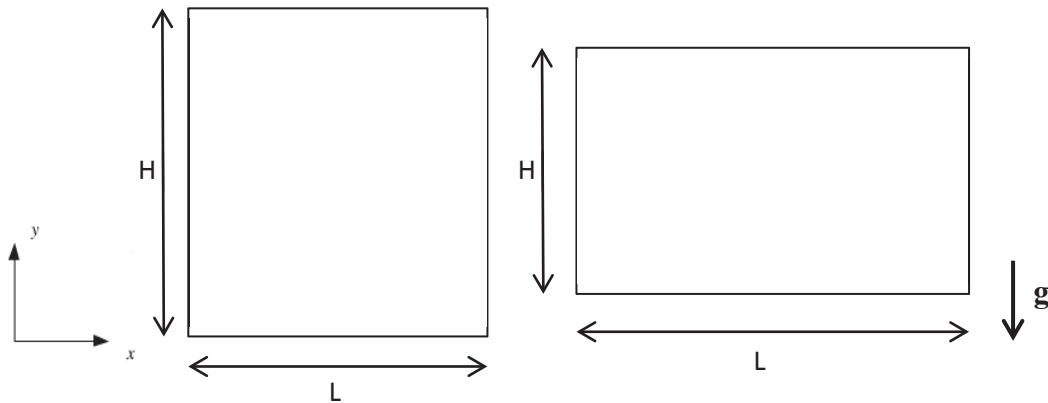
Bentuk cetakan es biasanya berbentuk bujur sangkar dan persegi panjang. Gambar 3.1 merupakan cetakan untuk es balok dengan massa 25 kg. Ukuran bidang atas dan bawah dari cetakan es bentuk bujur sangkar adalah 190 mm x 190 mm dan 180 mm x 180 mm. Sedangkan untuk persegi panjang mempunyai ukuran bidang atas dan bawah adalah 240 mm x 115 mm dan 210 x 120 mm. Kedua bentuk tersebut mempunyai ketinggian 1115 mm. Pada penelitian ini, tinggi benaman cetakan es di air garam diasumsikan 1000 mm.



Gambar 3.1 Bentuk cetakan es 25 kg dengan ukurannya

Penelitian ini menampilkan proses pembekuan air dengan geometri pemodelan 2D dimana pengambilan ukuran bujur sangkar dan persegi panjang didapat dari cetakan es yang berada di permukaan atas benaman air garam. Gambar 3.2 menunjukkan ukuran dari geometri pemodelan 2D yang ditambahkan

pengaruh gravitasi sehingga bisa didapatkan fenomena *natural convection*. Ukuran untuk bujur sangkar memiliki ukuran panjang sisi  $L = 186,5 \text{ mm}$ . Sedangkan persegi panjang memiliki ukuran  $H = 146,6 \text{ mm}$  dan  $L = 237,3 \text{ mm}$ . Kedua ukuran tersebut memiliki ukuran luas bidang ( $A$ ) =  $3,48 \times 10^2 \text{ cm}^2$ .



Gambar 3.2 Geometri pemodelan

### 3.2. Parameter Uji

Jenis fluida yang digunakan dalam penelitian ini adalah air dimana propertinya terinci pada tabel 3.1. di bawah ini.

Tabel 3.1 Properti fluida air

Properti dari fluida air		Nilai	Satuan
$\rho_0$	Densitas air pada temperatur referensi ( $T_{\text{ref}} = 273 \text{ K}$ )	999,8	$\text{kg/m}^3$
$\mu$	Viskositas dinamik	0,001003	$\text{kg/m.s}$
$k_l$	Konduktivitas termal	0,6	$\text{W/m.K}$
$C_p$	Panas spesifik	4.182	$\text{J/kg.K}$
$\beta_0$	Koefisien <i>thermal expansion</i> ( $T = 273 \text{ K}$ )	$6,734 \times 10^{-5}$	$1/\text{K}$

Untuk kasus *solidification*, Michalek & Kowalewski (2003) mendefinisikan temperatur *solid* ( $T_s$ ) =  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperature *liquid* ( $T_l$ ) =  $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , dan panas laten ( $\lambda$ ) =  $335 \text{ kJ/kg}$ . Dimana properti untuk es sendiri dianggap konstan dan sama dengan air kecuali 2 properti yaitu konduktivitas termal es ( $k_s$ ) =  $2,26 \text{ W/m.K}$  dan densitas es ( $\rho_s$ ) =  $916.8 \text{ kg/m}^3$ . Properti es untuk kasus *solidification* pada penelitian ini mengacu pada properti tersebut.



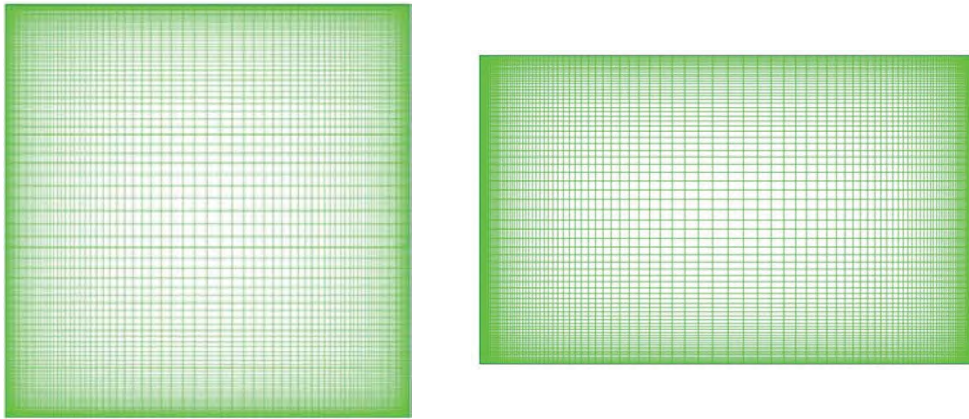
Untuk mendapatkan fenomena *natural convection* dengan pergerakan fluida berdasarkan perbedaan densitas partikelnya, metode Boussinesq-*incompressible* pada persamaan 2.6 digunakan dalam pemodelan ini. Nilai koefisien *thermal expansion* dan densitas awal yang digunakan adalah nilai properti yang ditunjukkan pada tabel 3.1. Metode ini juga dipakai di dalam pemodelan *solidification* yang digunakan untuk momentum arah y tetapi dengan menggunakan densitas yang berbeda yaitu  $\rho_s = 916.8 \text{ kg/m}^3$ .

Parameter uji yang divariasikan dalam penelitian ini adalah bentuk geometri dari cetakan es yaitu bujur sangkar dan persegi panjang. Simulasi yang dilakukan mencakup dua kasus yaitu *natural convection* dan *solidification*. *Natural convection* ditampilkan dengan dua *isothermal vertical wall* yang mempunyai perbedaan temperatur ( $\Delta T$ ) = 8 °C dimana temperatur awal dari fluida bertemperatur 4 °C. Kasus *solidification* yang ditampilkan adalah dengan pendinginan dari *wall* yang mempunyai temperatur lebih rendah jika dibandingkan dengan temperatur beku dari fluida. Tiga *wall* bertemperatur -8 °C dan satu *wall* bertemperatur 0 °C. Sementara temperatur awal dari fluida adalah 4 °C.

### 3.3. *Mesh dan Boundary Condition*

*Mesh* untuk kedua geometri yang dibuat adalah dalam bentuk *quadrilateral*. Gambar 3.3 menampilkan bentuk *mesh* dari kedua geometri dengan tingkat kerapatan *mesh* di dekat *wall* lebih rapat jika dibandingkan dengan *mesh* bagian tengah geometri. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan fenomena *thermal boundary layer* di dekat *wall*.

*Mesh* yang akan digunakan sebelumnya akan diuji dengan *grid independensi* untuk mendapatkan *mesh* yang paling akurat dan efisien dalam perhitungan simulasi. Ada empat variasi *mesh* yang dibuat untuk tujuan tersebut. Masing-masing memiliki jumlah elemen yang berbeda. Metode *interval count* digunakan untuk memvariasikan jumlah elemen pada *mesh* tersebut.

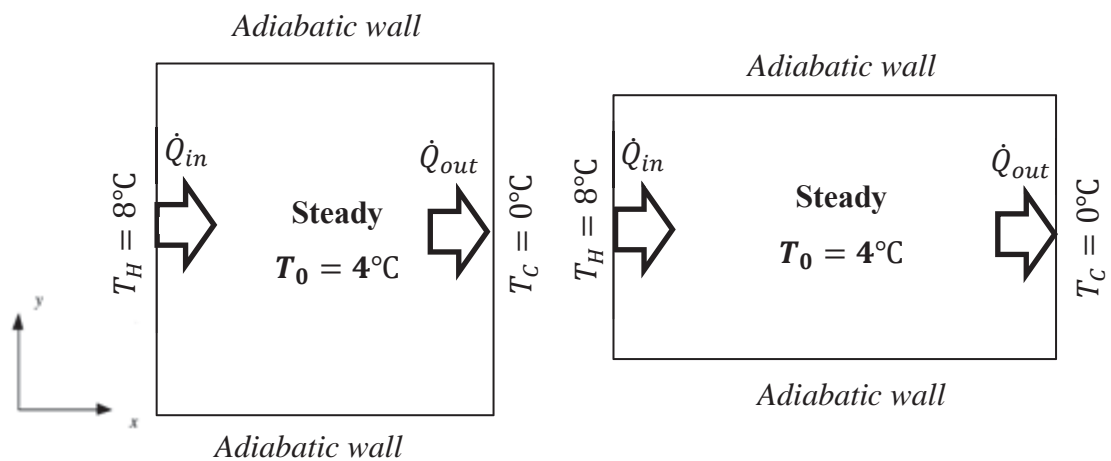


Gambar 3.3 Bentuk *mesh* geometri bujur sangkar dan persegi panjang

*Boundary condition* untuk kedua parameter uji ditampilkan sebagai berikut:

a. *Natural convection*

Gambar 3.4 memperlihatkan *boundary condition* dua *vertical wall* dengan perbedaan temperatur 8 °C dimana *isothermal hot wall* dengan  $T_H = 8\text{ °C}$  dan *isothermal cold wall* dengan  $T_C = 0\text{ °C}$ . Sedangkan dua *horizontal wall* (*top* dan *bottom*) dengan kondisi terinsulasi.

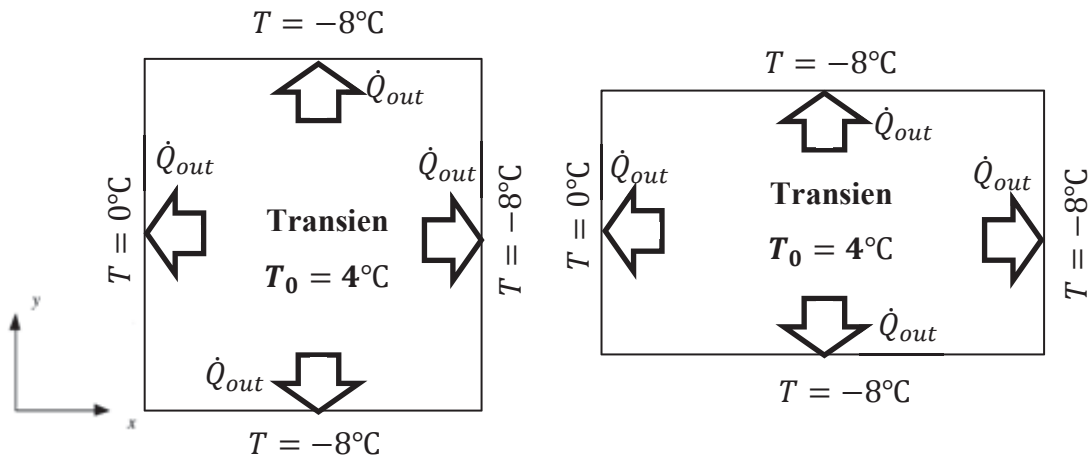


Gambar 3.4 *Boundary condition* bujur sangkar dan persegi panjang untuk kasus *natural convection*

b. *Solidification*

*Boundary condition* untuk proses *solidification* pada gambar 3.5 menunjukkan tiga *isothermal wall* dengan temperatur -8°C dan satu *wall* dengan temperatur 0°C. *Boundary condition* yang ditampilkan bertujuan mendapatkan fenomena yang berbeda dari *solidification* dari

cetakan es dimana dalam kondisi sebenarnya keempat sisi *wall* didinginkan dengan temperatur yang hampir simetri.



Gambar 3.5 *Boundary condition* bujur sangkar dan persegi panjang untuk kasus *solidification*

Semua *boundary condition* dibuat berdasarkan asumsi proses pendinginan dari air garam dengan arah aliran dari kanan ke kiri. Dimana kedua kasus menyajikan temperatur *wall* sebelah kanan lebih dingin daripada *wall* sebelah kiri.

### 3.4. Metode Perhitungan Numerik

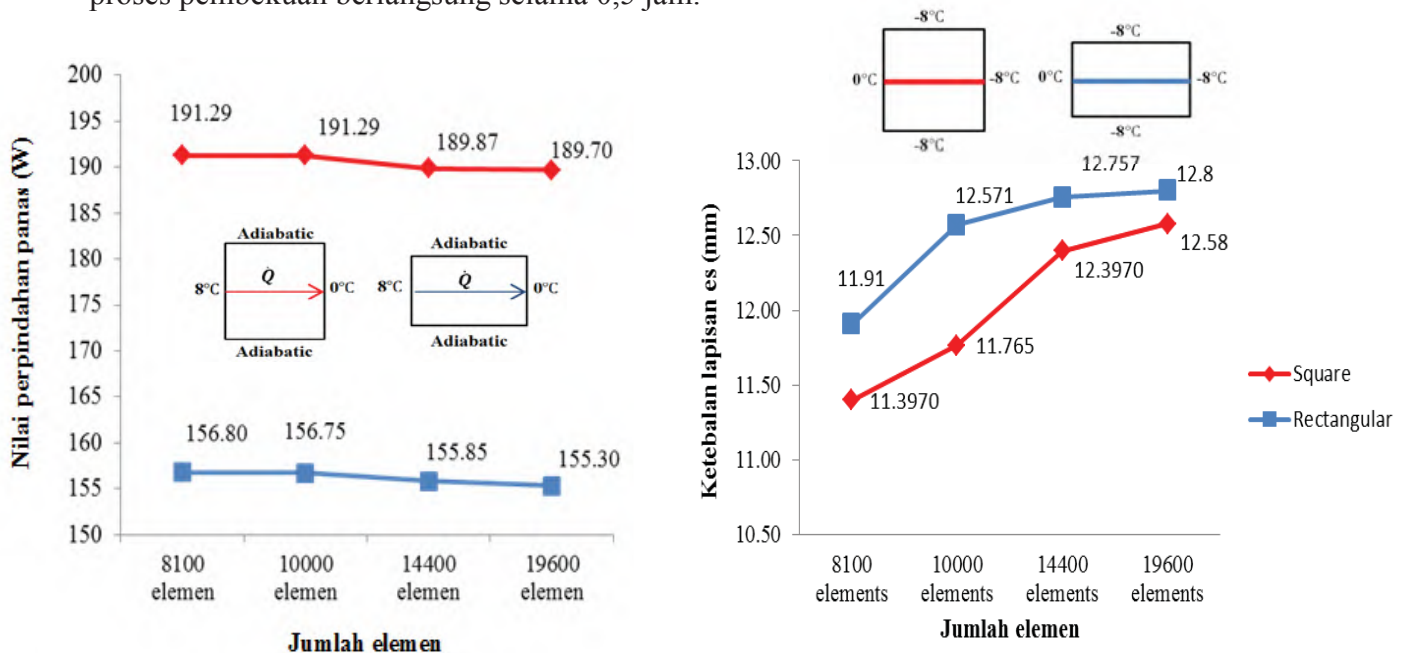
Perhitungan numerik dilakukan dengan menggunakan *software* komersial CFD. Dalam penelitian ini, *natural convection* dijalankan untuk mendapatkan kondisi *steady* dengan metode *implicit*. Sedangkan *solidification* dijalankan untuk mendapatkan kondisi transien dengan metode *second order implicit*.

Persamaan energi dan aliran laminar digunakan untuk perhitungan numerik *natural convection*. Persamaan aliran laminar digunakan karena nilai *Rayleigh number* ( $Ra_H$ ) baik geometri persegi maupun persegi panjang memiliki  $Ra_H \sim 10^8$  yaitu di bawah nilai  $Ra_H \sim 10^9$  dari aliran transisi.

Deskritisasi yang digunakan untuk *pressure* adalah PRESTO yang direkomendasikan dalam fluent 6.3 *user's guide* untuk pemodelan *natural convection* dengan *pressure velocity coupling* SIMPLE. Sedangkan deskritisasi untuk momentum dan energi menggunakan *second order upwind*. Perhitungan dari *continuity*, kecepatan arah x, kecepatan arah y, dan energi menggunakan nilai residual  $10^{-6}$  untuk kedua pemodelan.

### 3.5. Grid Independensi dan Validasi

Sebelum melakukan pemodelan, penelitian ini menggunakan *grid* independensi untuk memilih *mesh* yang paling bagus dan efektif dalam perhitungan. Pengujian *grid* independensi dilakukan dengan menguji 4 tingkatan *mesh* dari mulai mesh terkasar hingga yang paling halus. *Mesh* yang digunakan adalah dengan jumlah 8.100, 10.000, 14.400 dan 19.600 elemen. *Mesh* terkasar dengan jumlah 8.100 elemen dan terhalus dengan 19.600 elemen. Pengujian ini dilakukan untuk mengecek nilai perpindahan panas yang dipindahkan dari *hot wall* ke *cold wall* untuk kasus *natural convection*, sedangkan untuk kasus *solidification* digunakan untuk mengecek ketebalan lapisan es dari *right wall* saat proses pembekuan berlangsung selama 0,5 jam.



Gambar 3.6 pengujian *grid* independensi

Hasil pengujian *grid* independensi yang dilakukan kepada 4 tingkatan *mesh* tersebut dapat dilihat dari grafik pada gambar 3.6. *Mesh* dengan jumlah 14.400 elemen lebih mendekati *nilai* perpindahan panas dan ketebalan lapisan es dari *mesh* terhalus untuk kedua geometri. Oleh karena itu, *mesh* tersebut akan digunakan dalam setiap pemodelan yang dilakukan.

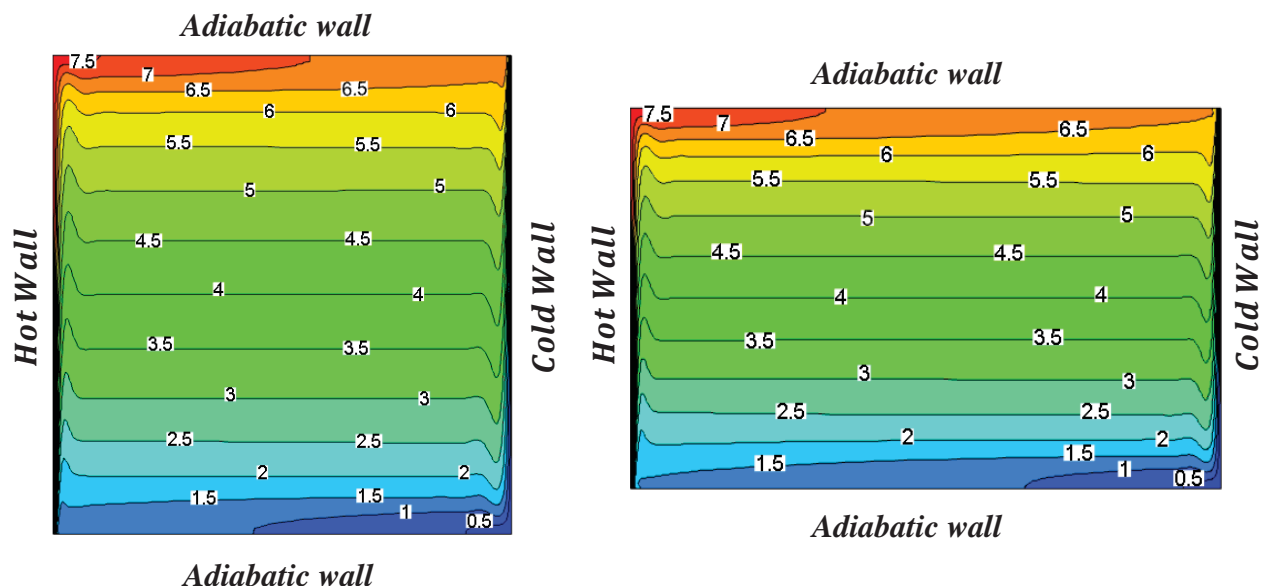
## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menjelaskan mengenai hasil solusi pemodelan yang didapat dari perbandingan bentuk cetakan es bujur sangkar dan persegi panjang. Pemodelan yang dilakukan yaitu *natural convection* kondisi *steady* dan *solidification* kondisi *transien* secara 2 dimensi.

#### 4.1 Natural Convection

Fenomena *natural convection* kondisi *steady* yang terjadi pada kedua bentuk cetakan es ditampilkan dengan *boundary condition* untuk horizontal wall adalah terinsulasi. Sedangkan *vertical wall* dengan temperatur *hot wall* ( $T_H$ ) adalah  $8^\circ\text{C}$  dan *cold wall* ( $T_C$ ) adalah  $0^\circ\text{C}$ . Perbedaan temperatur dari *vertical wall* mengakibatkan perbedaan densitas pada partikel air di dalam cetakan. Gambar 4.1 menunjukkan bahwa partikel air yang memiliki temperatur lebih tinggi akan bergerak naik ke atas karena gaya *buoyancy* akibat pemanasan dari *hot wall*. Sedangkan partikel air dengan temperatur lebih rendah karena pendinginan *cold wall* akan berada di bawah karena densitas yang dimiliki partikel lebih besar.



Gambar 4.1 Kontur temperatur ( $^\circ\text{C}$ ) dari kasus *natural convection* kondisi *steady*

#### 4.1.1. Perpindahan Panas *Natural Convection*

Perpindahan panas yang terjadi untuk fenomena *natural convection* ini adalah penyerapan energi panas oleh fluida dari *hot wall* dan pelepasan energi panas dari fluida ke *cold wall*. Keseimbangan energi terjadi dimana besarnya energi panas yang diserap maupun dilepas fluida adalah sama. Dari hasil solusi pemodelan didapatkan nilai penyerapan dan pelepasan energi panas per satuan waktu untuk kedua geometri ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Penyerapan dan pelepasan energi panas hasil solusi pemodelan

Geometri	<i>Hot wall</i> (J/s)	<i>Cold wall</i> (J/s)
Bujur sangkar	189,87	189,87
Persegi panjang	155,86	155,86

Dari tabel di atas, perpindahan panas yang dipindahkan dari *hot wall* ke *cold wall* melalui fluida air menunjukkan bahwa bentuk bujur sangkar lebih baik daripada persegi panjang. Besarnya energi panas yang dipindahkan oleh fluida air per satuan waktu dari bujur sangkar adalah 21,82 % lebih besar dari pada persegi panjang.

Persamaan besarnya energi panas yang dipindahkan untuk kasus *natural convection* di dalam *cavity* pada persamaan 2.14 tergantung dari besarnya konduktivitas termal, selisih temperatur antara kedua *vertical wall*, dan besarnya *Rayleigh number* ( $Ra_H$ ). Untuk kasus bentuk cetakan dengan geometri yang berbeda, faktor yang paling berpengaruh adalah nilai dari *Rayleigh number* dari geometri itu sendiri. Bujur sangkar mempunyai nilai  $Ra_H = 2,38 \times 10^8$  sedangkan persegi panjang dengan  $Ra_H = 1,16 \times 10^8$ . Oleh karena itu, geometri yang mempunyai *Rayleigh number* yang berbeda akan berpengaruh terhadap besarnya energi panas yang dipindahkan dari *hot wall* ke *cold wall* melalui fluida di dalam *cavity* tersebut.

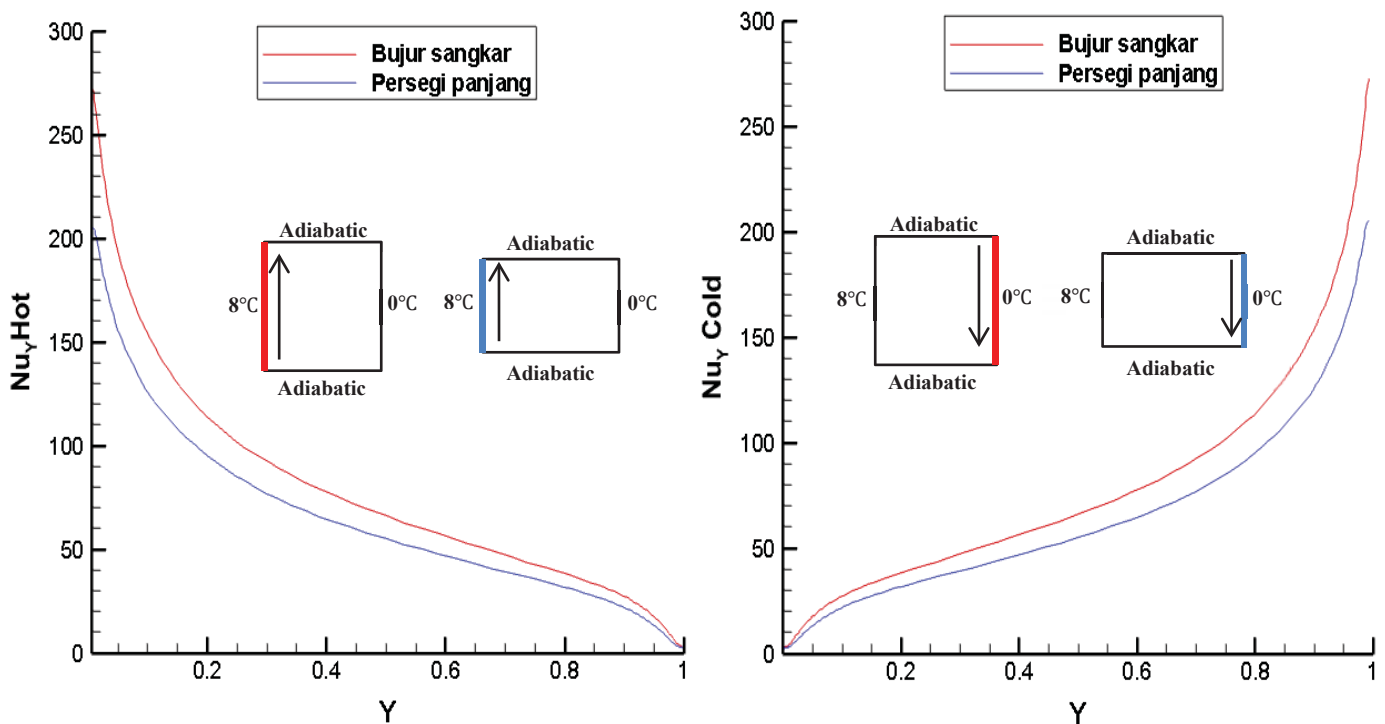
*Nusselt number* adalah bilangan *dimensionless* yang membandingkan koefisien konveksi dan konduksi. Bilangan ini dapat mengindikasikan besar dan kecilnya perpindahan panas yang terjadi. Nu rata-rata untuk kriteria *boundary layer regime* dihitung berdasarkan persamaan 2.12. dimana persamaan ini ditujukan ketiga *regime* pada  $L/H < 1$ . Sedangkan untuk  $H/L = 1$  digunakan

persamaan 2.13. Nilai  $Nu$  rata-rata dari bujur sangkar dan persegi panjang dari hasil perhitungan maupun pemodelan ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 *Nusselt number* rata-rata dari perpindahan panas

Geometri	$\overline{Nu}$ Teoritis	$\overline{Nu}$ Pemodelan	Error (%)
Bujur sangkar	47,97 (Pers. 2.13)	49,36	2,90
Persegi panjang	42,28 (Pers. 2.12)	39,10	7,51

Dari hasil perhitungan teoritis maupun hasil numerik pemodelan menunjukkan bahwa nilai  $\overline{Nu}$  bujur sangkar lebih baik dari pada persegi panjang. Hal ini membuktikan bahwa dengan nilai koefisien konveksi bujur sangkar lebih besar, nilai perpindahannya pun lebih baik daripada persegi panjang.



Gambar 4.2  $Nu_Y$  lokal *hot* dan *cold wall* untuk proses *natural convection*

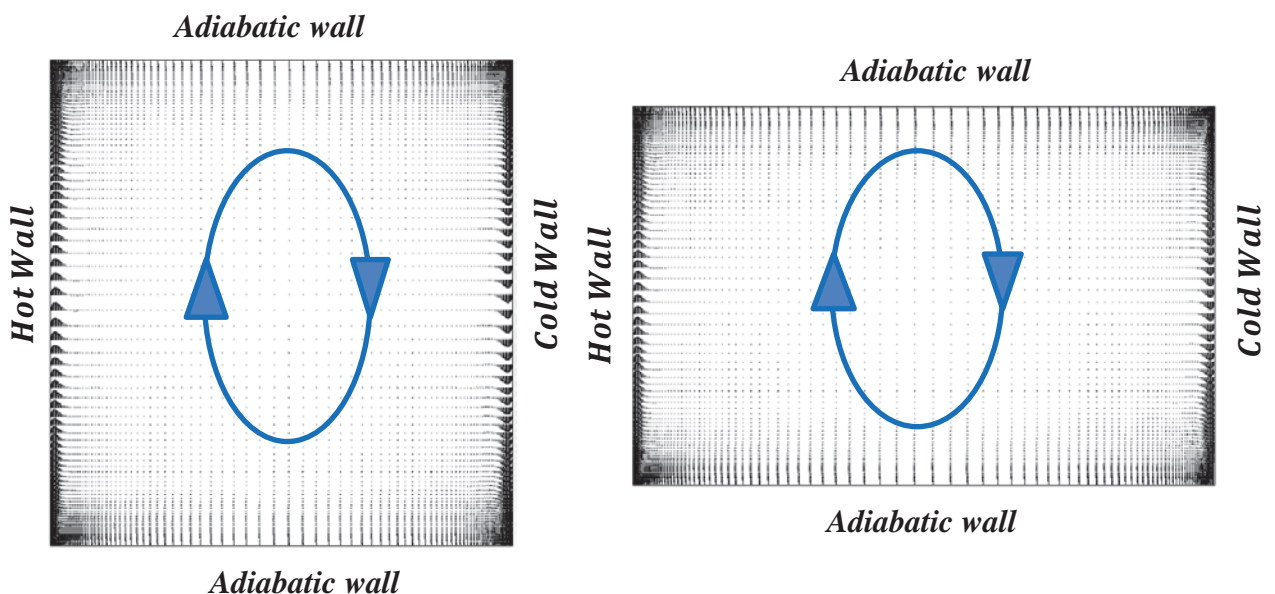
Grafik  $Nu_Y$  lokal pada gambar 4.2 menunjukkan bahwa terjadi keseimbangan termal pada kedua *vertical wall*. Hal ini dibuktikan dengan nilai koefisien perpindahan panas yang sama untuk *hot* dan *cold wall*. Hasil pada tabel 4.2 diperkuat dengan nilai  $Nu_Y$  lokal pada *vertical wall* (*hot* dan *cold*). *trend line*  $Nu_Y$  lokal di daerah *vertical wall*, bujur sangkar lebih besar dibandingkan dengan persegi panjang.  $Nu_Y$  *hot* mengalami penurunan ketika aliran fluida bergerak



mendekati *top adiabatic wall*. Sedangkan hal sebaliknya untuk  $Nu_{cold}$  menurun ketika aliran fluida bergerak mendekati *bottom adiabatic wall*.

#### 4.1.2 Pergerakan Aliran Fluida di Dalam Cavity

Pergerakan aliran untuk kasus *natural convection* disebabkan karena perbedaan temperatur antara kedua *vertical wall*. Pergerakan aliran dapat dilihat pada gambar 4.3 dan gambar 4.4 tentang vektor kecepatan *magnitude* dan *streamline* aliran dari fluida. Pergerakan fluida air untuk kedua geometri memiliki pola yang sama yaitu searah dengan jarum jam. Fluida air akan bergerak ke atas karena pemanasan dari *hot wall* dan terekpansi sebelum proses pendinginan pada *cold wall*. Sedangkan karena pendinginan fluida air akan turun ke bawah dan terkompresi sebelum proses pemanasan pada *hot wall*. Proses pergerakan aliran fluida akan terus berlangsung selama perbedaan temperatur untuk kedua *vertical wall* masih terjadi.

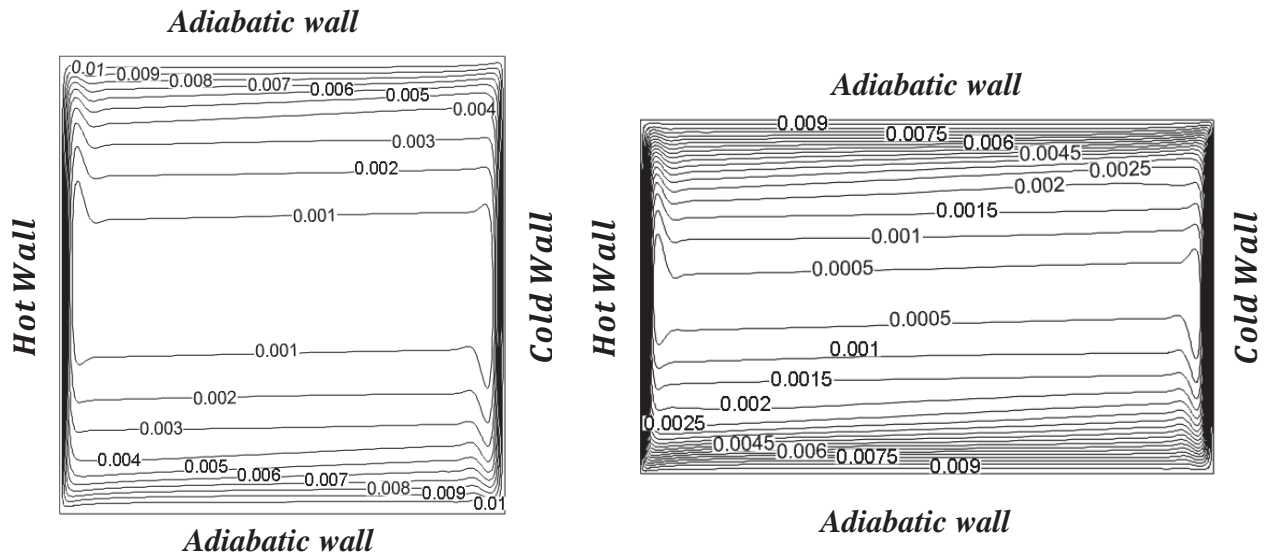


Gambar 4.3 Vektor kecepatan *magnitude* (m/s) untuk proses *natural convection*

Berdasarkan kecepatan *magnitude* dan *streamline* dari kedua geometri, bujur sangkar mempunyai kecepatan *magnitude* dan *streamline* yang lebih besar dari pada persegi panjang. Untuk besarnya kecepatan *magnitude*, bujur sangkar dengan kecepatan maksimal 2,8 mm/s sedangkan persegi panjang dengan kecepatan maksimal 2,5 mm/s. Untuk *streamline*, bujur sangkar mempunyai nilai pergerakan aliran maksimal 0,01 kg/s sedangkan persegi panjang hanya 0,09 kg/s.



Kecepatan *magnitude* maksimal kedua geometri berada pada daerah dekat *hot* dan *cold wall*. Sedangkan untuk *streamline* terbentuk berlapis-lapis dengan nilai maksimum di dekat horizontal maupun *vertical wall* dengan daerah minimalnya di *core* aliran fluida. Hal ini membuktikan bahwa nilai kecepatan maupun *streamline* aliran fluida akan sebanding dengan nilai perpindahan panasnya.



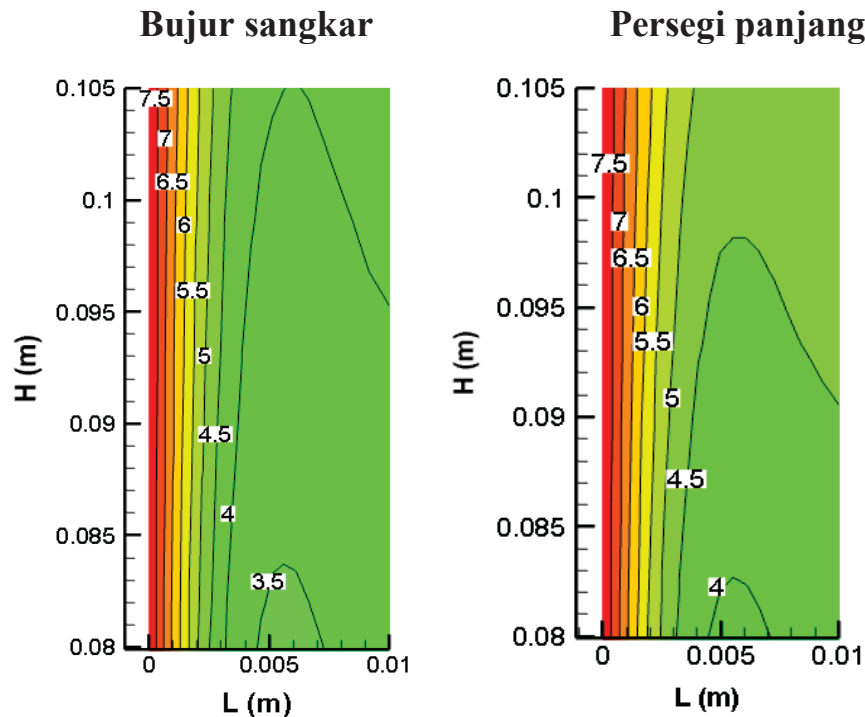
Gambar 4.4 *Streamline* (kg/s) untuk proses *natural convection*

#### 4.1.3 Thermal dan Velocity Boundary Layer

*Rayleigh number* ( $Ra_H$ ) untuk bujur sangkar adalah  $2,38 \times 10^8$  dan persegi panjang dengan nilai  $1,16 \times 10^8$ . Kedua geometri ini sama-sama mempunyai nilai  $Ra_H$  yang tinggi dan termasuk ke dalam *high- $Ra_H$  limit* (*boundary layer regime*). Untuk *regime* ini, *thermal* dan *velocity boundary layer* terbentuk sepanjang kedua *vertical wall* (*hot* dan *cold*).

Gambar 4.5 memperlihatkan *thermal boundary layer* di *vertical hot wall* untuk kedua geometri dengan ketebalan  $\delta_{T,f} < 0,005$  m. Berdasarkan perhitungan persamaan 2.8, bujur sangkar memiliki ketebalan *thermal boundary layer* ( $\delta_{T,f}$ )  $\sim 0,0015$  m dari *wall*. Sedangkan persegi panjang dengan nilai  $\delta_{T,f} \sim 0,0014$  m. Lapisan *thermal boundary layer* dari bujur sangkar lebih banyak dan lebih rapat jika dibandingkan dengan persegi panjang. Sebagai contoh, jika *thermal boundary*

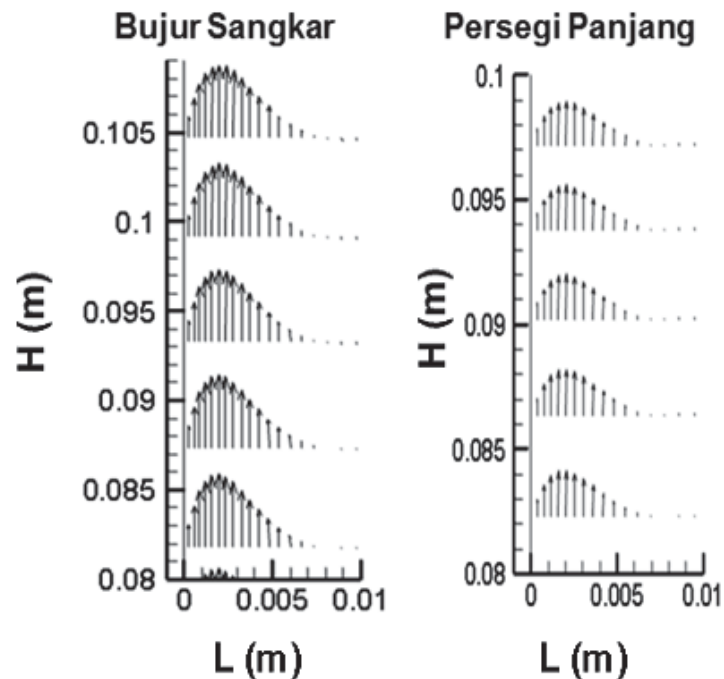
layer bujur sangkar dengan temperatur 5°C berada pada posisi 0,002 m sedangkan untuk persegi panjang berada pada posisi > 0,002 m.



Gambar 4.5 *Thermal boundary layer pada hot wall*

*Wall jet* untuk *vertical layer* tampak jelas pada gambar 4.6 menunjukkan  $\delta_{v,f} > 0,005 \text{ m}$ . Ketebalan *velocity boundary layer* juga bisa diprediksi berdasarkan teori. Berdasarkan persamaan 2.9 ketebalan *velocity boundary layer* bujur sangkar mempunyai  $\delta_{v,f} \sim 0,004 \text{ m}$  sedangkan persegi panjang  $\delta_{v,f} \sim 0,0037 \text{ m}$ . Pada gambar 4.6 dapat dilihat juga bahwa vektor kecepatan *magnitude* dari *velocity boundary layer*, bujur sangkar lebih tajam vektornya jika dibandingkan dengan persegi panjang.

Berdasarkan nilai perpindahan panas yang lebih besar untuk bujur sangkar dalam kasus *natural convection*, fenomena *thermal* dan *velocity boundary layer* adalah faktor yang mempengaruhi perpindahan panasnya. *Thermal boundary layer* yang lebih rapat dan kecepatan *magnitude* dari *velocity boundary layer* yang lebih cepat mengakibatkan perpindahan panasnya lebih besar.



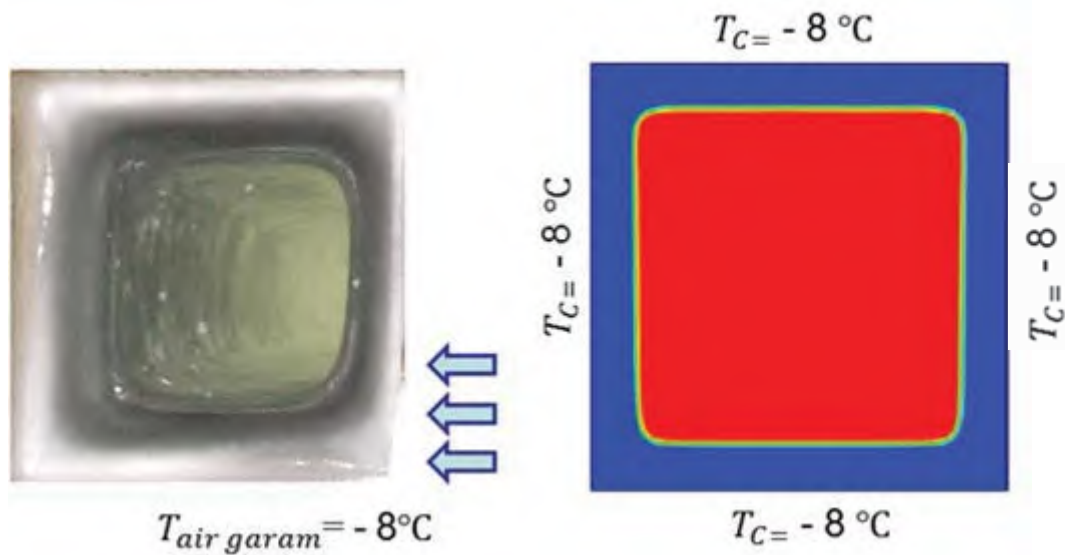
Gambar 4.6 *Velocity boundary layer* pada *hot wall*

#### 4.2 *Solidification* pada Cetakan Es Balok

Proses pembuatan es balok yaitu dengan merendam cetakan es yang telah diisi air ke dalam *pond* air garam bertemperatur rendah yang disirkulasikan dengan agitator. Air garam yang memiliki temperatur lebih rendah berfungsi menyerap energi panas yang terkandung di dalam air baik panas sensibel maupun laten. Air garam kemudian melepas energi panas tadi ke evaporator sistem pendingin dan tersirkulasi sampai air di dalam cetakan membeku.

Gambar 4.7 adalah perbandingan kondisi nyata dan hasil pemodelan. Cetakan es didinginkan pada kondisi aliran air garam bertemperatur  $-8^{\circ}\text{C}$  dimana untuk pemodelan sendiri diasumsikan pendinginan pada keempat *wall* cetakan es adalah *isothermal* dengan temperatur  $-8^{\circ}\text{C}$ . Awalnya, penyerapan panas sensibel dan laten terjadi langsung pada *wall*. Namun setelah lapisan es terbentuk dari keempat sisi dalam *wall*, partikel fluida yang berbentuk cair dikelilingi *liquid solid interface*. Dalam kasus pembekuan ini, panas laten dari air diserap oleh

*liquid solid interface* untuk selanjutnya dipergunakan untuk berubah fasa menjadi es. Perkembangan lapisan es dari keempat sisi terlihat mempunyai ketebalan yang simetri karena besarnya pelepasan energi panas adalah hampir sama besar.



Gambar 4.7 Lapisan es pada cetakan kondisi nyata (kiri) dan pemodelan (kanan) saat proses pembekuan 1,5 jam

#### 4.3 Solidification dengan *Boundary Condition* yang Berbeda

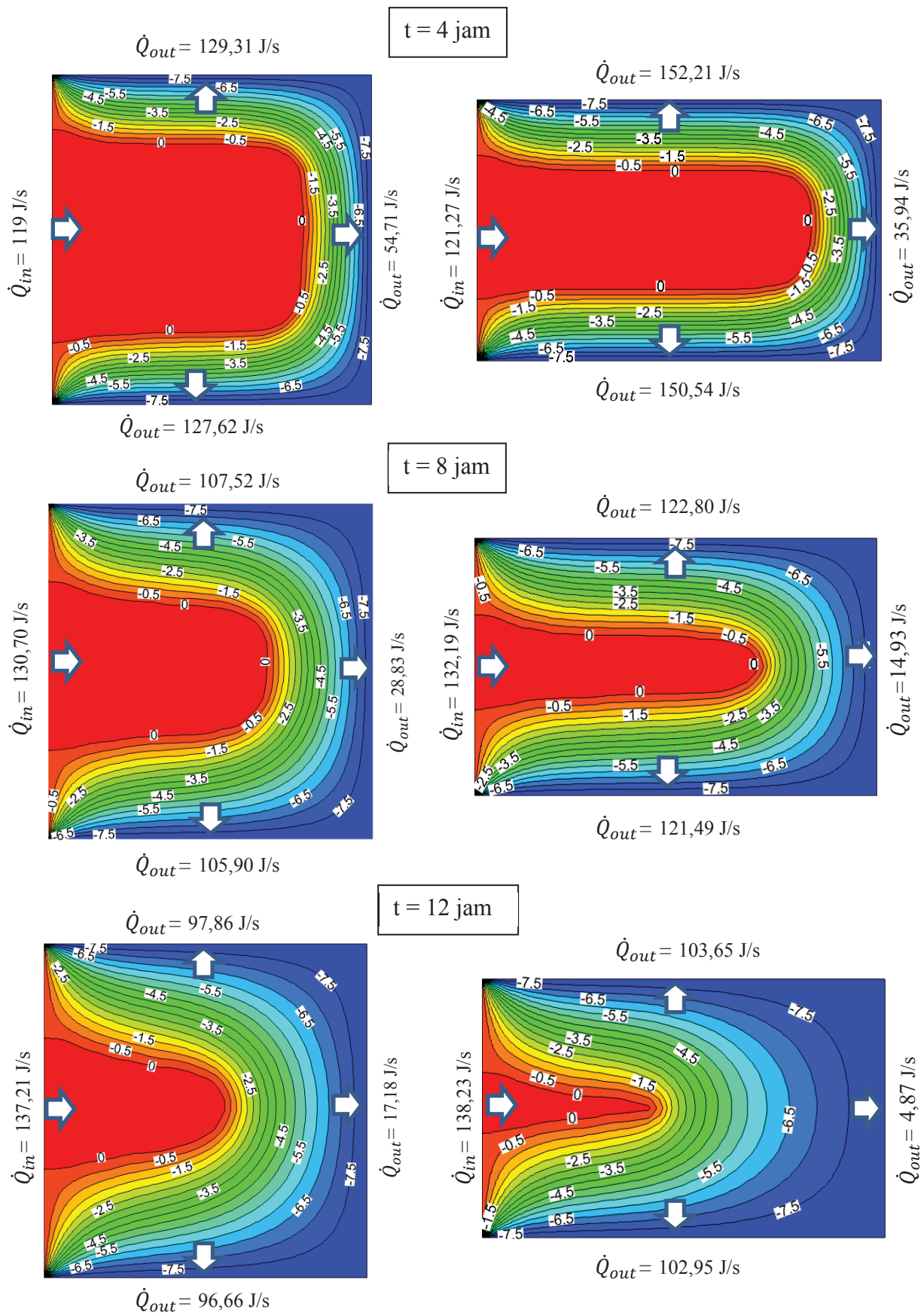
Pada penelitian ini, hal yang berbeda akan ditampilkan untuk proses pembekuan es balok. Hal yang berbeda tersebut adalah mengenai *boundary condition* untuk *wall* cetakan es. Sesuai kondisi nyata yang telah diperlihatkan pada gambar 4.7, fenomena pembekuan es akan mudah diprediksi dan kurang menarik untuk dijelaskan. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba menghadirkan *boundary condition* sesuai pada gambar 3.5 untuk mendapatkan hasil yang lebih menarik. Perbedaan temperatur dikondisikan untuk 3 *wall* dengan temperatur  $-8^{\circ}\text{C}$  dan 1 *wall* dengan temperatur lebih tinggi daripada *wall* lainnya yaitu  $0^{\circ}\text{C}$ .

Gambar 4.8 memperlihatkan kontur temperatur hasil dari solusi pemodelan saat 4 jam, 8 jam, dan 12 jam. Lapisan-lapisan temperatur dengan nilai yang berbeda terlihat di dekat *wall* yang terjadi pelepasan panas dari air yaitu *top*, *bottom*, dan *right wall*. Sedangkan untuk di dekat *left wall* tidak terbentuk lapisan-lapisan temperatur tersebut. Hal ini mengakibatkan bentuk profil temperatur cembung ke arah *right wall* dan terlihat seperti bentuk -u yang menghadap ke *left*

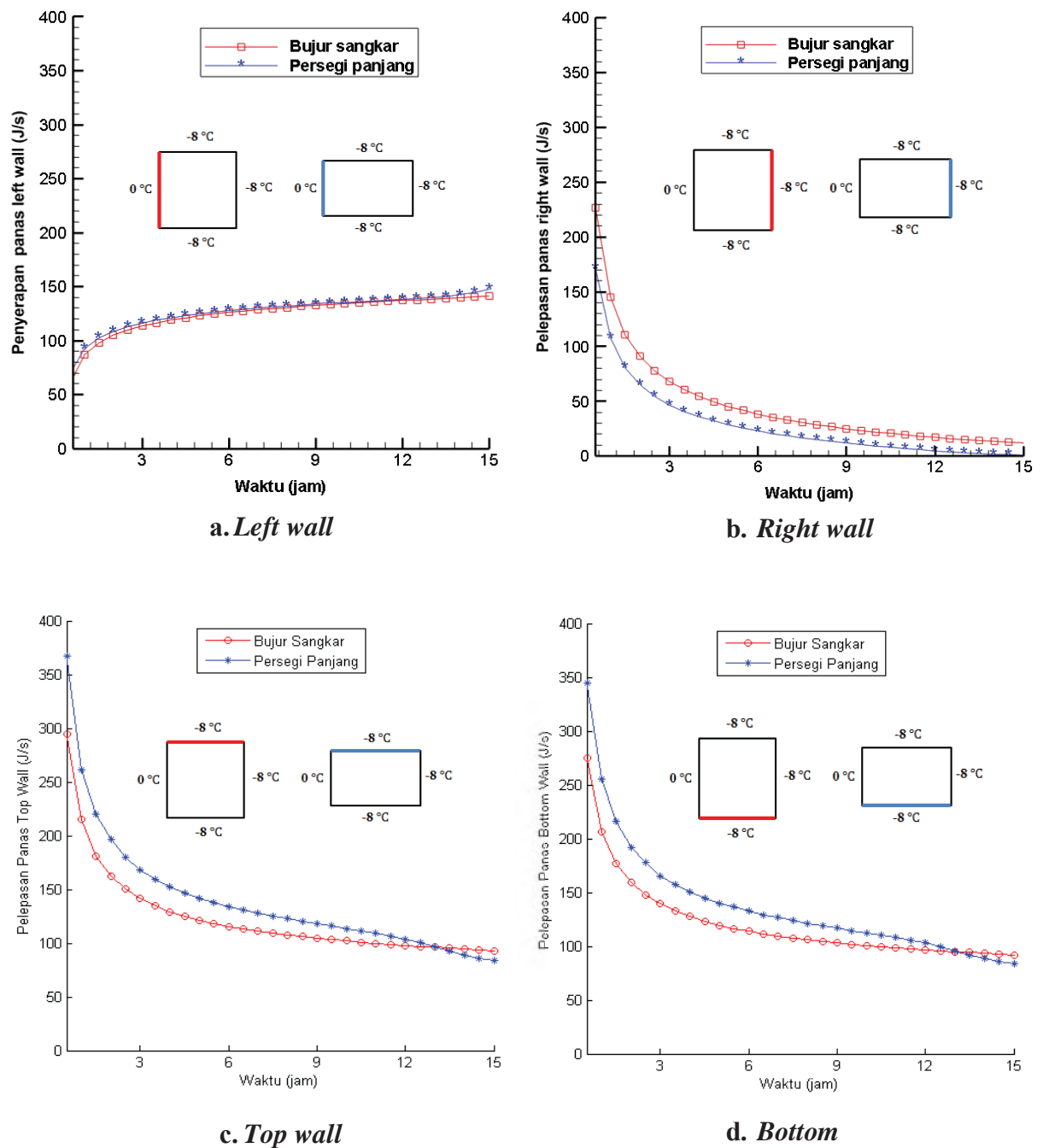
*wall*. Perkembangan temperatur yang lebih dingin dari air berkembang dari ketiga *wall* sebagai tempat pelepasan panas akan bergeser ke kiri seiring bertambahnya waktu. Sehingga profil temperatur juga akan berubah dimana temperatur dengan nilai  $-8^{\circ}\text{C}$  akan semakin mendominasi atau semakin luas sedangkan untuk temperatur di atas  $0^{\circ}\text{C}$  akan semakin berkurang atau menyempit.

. Hasil solusi pemodelan pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwa terjadi pelepasan panas dari fluida air untuk *top*, *bottom*, dan *right wall*. Sedangkan penyerapan panas oleh air dari *wall* terjadi pada *left wall*. Hal ini karena terdapat sebagian fluida yang lebih dingin temperaturnya daripada *left wall* dan telah berubah menjadi es. Penyerapan panas dari *left wall* oleh es yang memiliki temperatur lebih rendah menyebabkan kerugian pada proses *solidification* yaitu memperlama pembentukan es terutama yang berada di dekat *left wall*. Grafik pada gambar 4.9 b, c dan d menunjukkan besarnya energi panas yang dilepaskan air atau lapisan es ke tiga sisi *wall* baik *top*, *bottom* dan *right wall*. *Right wall* terlihat lebih kecil melepaskan energi panas jika dibandingkan dengan *top* dan *bottom wall*. Hal ini akibat dari pengaruh penyerapan panas yang terjadi pada *left wall*.

Pelepasan panas di ketiga *wall* menunjukkan bahwa semakin bertambahnya waktu proses *solidification*, tren grafiknya semakin menurun. Namun penyerapan panas di *left wall* semakin bertambah. Secara keseluruhan nilai perpindahan panas yang dilepaskan oleh fluida sangat dominan jika dibandingkan penyerapan panas di *left wall*. Hal inilah yang menyebabkan proses perubahan fasa (*liquid* menjadi *solid*) berlangsung. Perubahan fasa ini terjadi karena panas sensibel dan laten yang terkandung di dalam fluida air sebagian besar dilepaskan ke *wall*. Secara keseluruhan dengan *boundary condition* yang diberikan untuk proses *solidification* ini, geometri cetakan es persegi panjang lebih banyak melepaskan panas dari air jika dibandingkan dengan bujur sangkar pada *top* dan *bottom wall*.



Gambar 4.8 Kontur temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) dari kasus *solidification* kondisi transien saat 4 jam, 8 jam, dan 12 jam

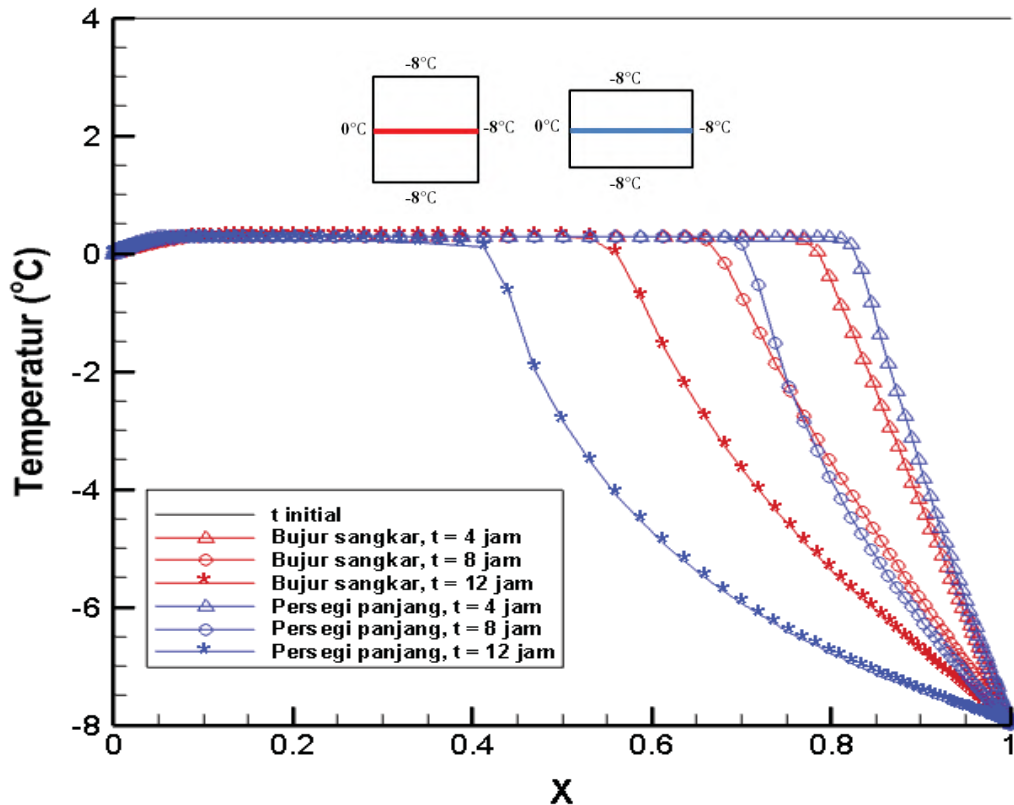


Gambar 4.9 Grafik penyerapan dan pelepasan energi panas dari air ke *wall* cetakan es selama proses *solidification*

Gambar 4.10 menunjukkan distribusi temperatur pada  $y/h = 0,5$  dimana pada 4 jam awal bujur sangkar mempunyai penurunan temperatur yang lebih baik di dekat *right wall*. Namun setelah 8 jam proses pendinginan, penurunan temperatur pada persegi panjang terlihat lebih cepat jika dibandingkan bujur sangkar. Bahkan setelah saat 12 jam, persegi panjang jauh lebih unggul. Hal ini



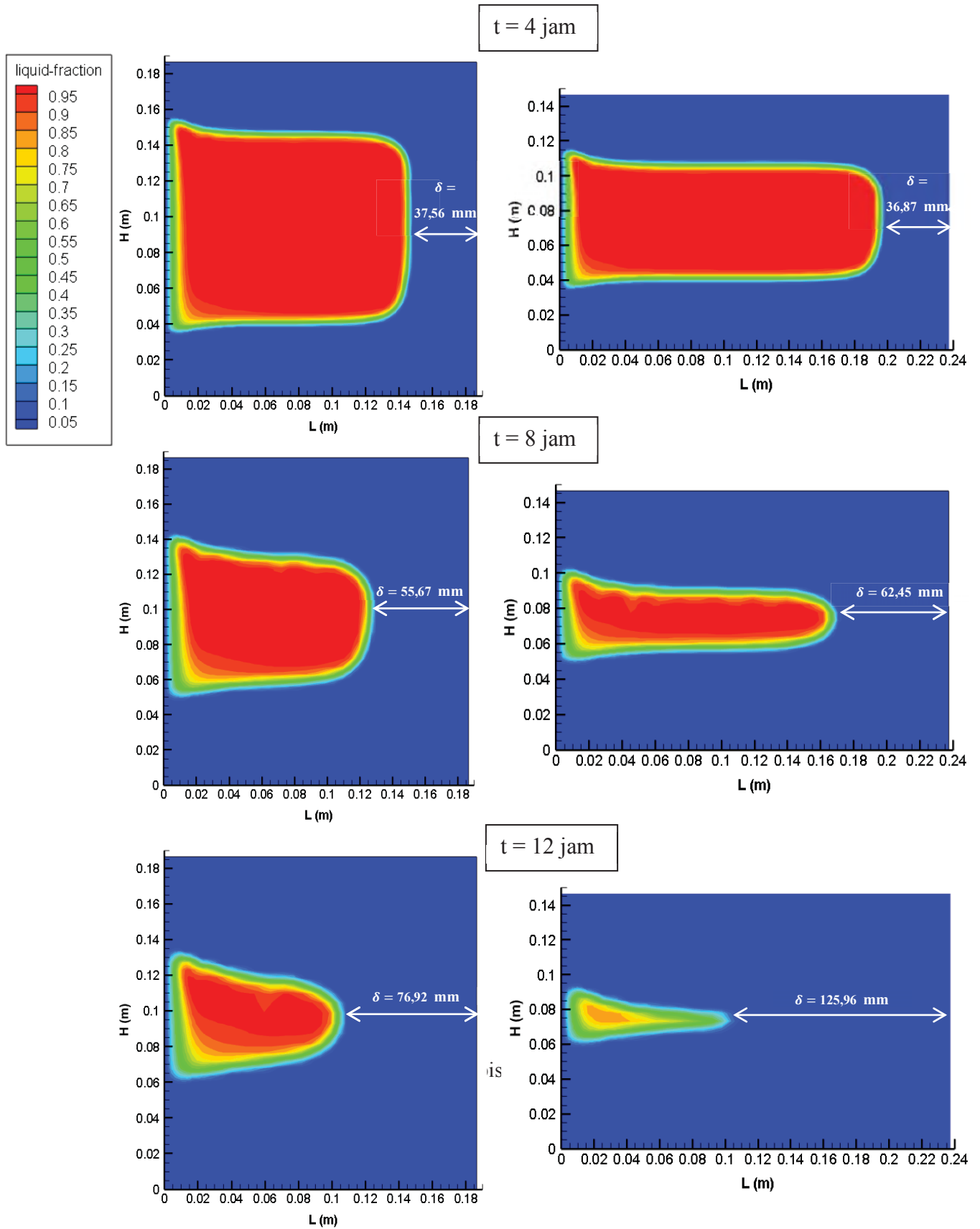
membuktikan bahwa pelepasan energi panas dari air untuk persegi panjang lebih cepat dibandingkan dengan bujur sangkar.



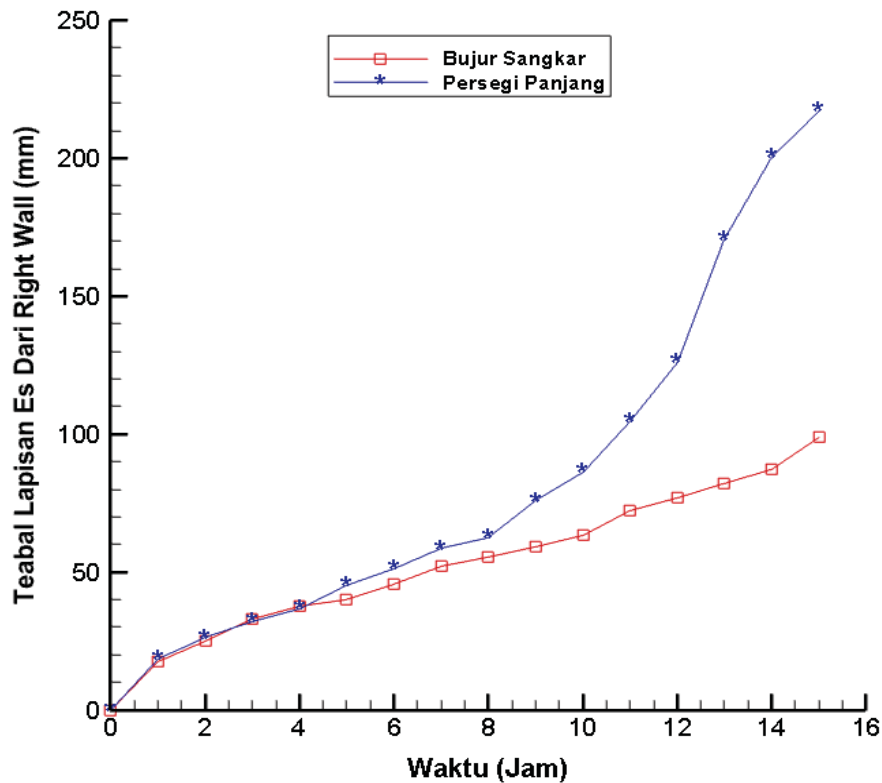
Gambar 4.10 Distribusi temperatur untuk  $y/h = 0,5$  saat 4 jam, 8 jam, dan 12 jam

Gambar 4.11 memperlihatkan kontur *liquid fraction* selama proses *solidification*. *Solid fraction* semakin berkembang dari arah *top*, *bottom*, dan *right wall*. Hal ini menunjukkan semakin tebalnya lapisan es selama proses *solidification* dan berkurangnya *liquid fraction* di dalam cetakan es karena pelepasan energi panas yang besar untuk ke tiga wall tersebut. Pergerakan *solid liquid interface* sebagai lapisan yang menyerap panas laten dari *liquid* air bergerak hanya dari ketiga 3 sisi wall tempat pelepasan energi panas dari air. Semakin besar energi panas laten yang diserap untuk berubah fasa menjadi es, *solid liquid interface* akan semakin kecil ukurannya sampai pelepasan panas laten dari air selesai. Pergerakan *solid liquid interface* ini bergerak dari ketiga sisi wall yang lebih dingin yang selanjutnya akan mengecil dan terpusat di tengah-tengah *left wall*.





Gambar 4.11 Kontur *liquid fraction* selama proses *solidification*

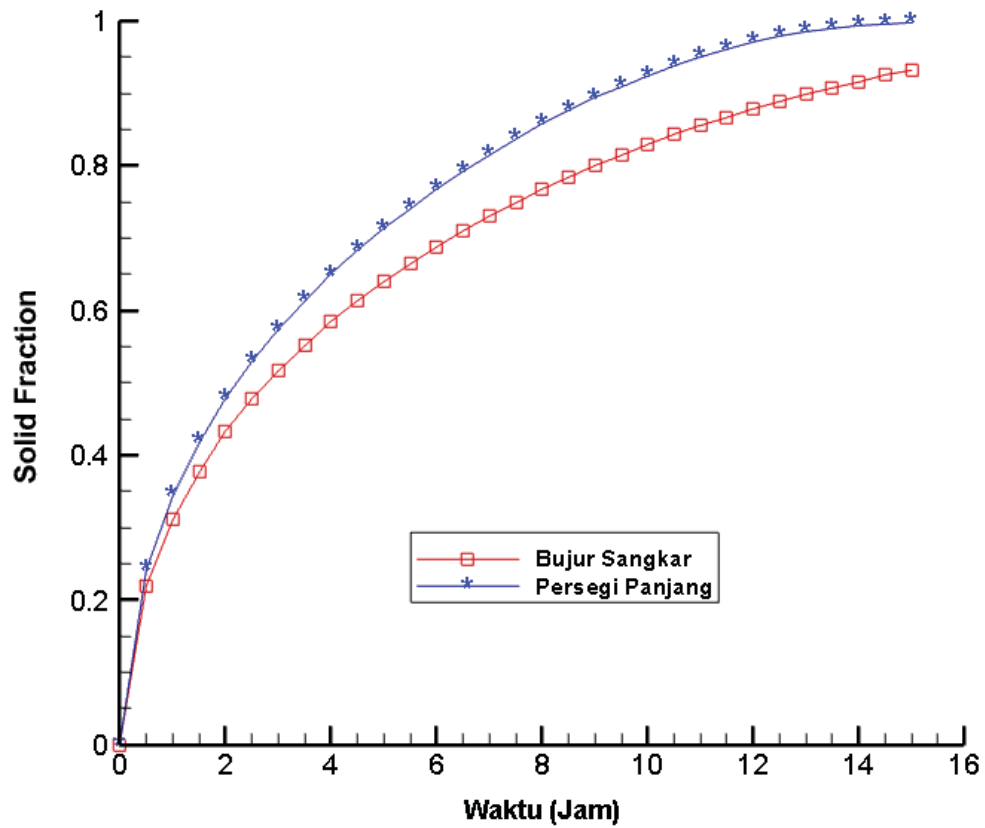


Gambar 4.12 Grafik ketebalan lapisan es ( $\delta$ ) pada  $y/h = 0,5$  dari *right wall*

Gambar 4.12 menunjukkan perkembangan ketebalan lapisan es yang terbentuk pada  $y/h = 0,5$  dari sisi *rightwall*. Lapisan es pada *rightwall* dari persegi panjang berkembang lebih cepat saat waktu pembekuan lebih dari 4 jam jika dibandingkan bujur sangkar. Saat proses pembekuan berlangsung selama 15 jam, ketebalan lapisan es dari *rightwall* untuk persegi panjang dibanding panjang geometrinya ( $\delta/L$ ) . memiliki nilai 0.92. Sedangkan untuk bujur sangkar, rasio ( $\delta/L$ ) bernilai 0,53.

Gambar 4.13 menunjukkan *solid fraction* yang semakin berkembang dari waktu ke waktu sebagai tanda bahwa lapisan es semakin berkembang juga. Grafik menunjukkan bahwa geometri cetakan es persegi panjang lebih cepat daripada bujur sangkar dalam proses *solidification*. Pada cetakan persegi panjang, air hampir berubah menjadi es secara keseluruhan hanya membutuhkan waktu 15 jam. Namun, hasil yang berbeda ditunjukkan oleh bujur sangkar yang masih memiliki kandungan *liquid fraction* di dalamnya. Pada waktu 15 jam, persegi panjang memiliki kandungan *solid fraction* sebesar 99,81 %. Namun untuk bujur sangkar kandungan *solid fraction*-nya hanya 93,25 %. Hal ini dapat menjelaskan pembekuan air di dalam cetakan es berbentuk persegi panjang lebih cepat 7,03 % dari pada bujur sangkar. Untuk kedua cetakan, terjadi perlambatan perkembangan

*solid fraction* yang disebabkan oleh perpindahan energi panas yang semakin mengecil di dalam cetakannya.



Gambar 4.13 Grafik *solid fraction* selama proses *solidification*

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian dan pembahasan pada bab 4 adalah sebagai berikut :

1. Fenomena *natural convection* kondisi *steady* untuk kedua geometri bujur sangkar dan persegi panjang terjadi kesetimbangan termal antara sisi *hot* maupun *cold wall*. Energi yang diterima dari sisi *hot wall* sama besarnya dengan energi yang dilepaskan pada sisi *cold wall* dan tidak terjadi penyimpanan energi di dalam fluida air sehingga temperatur di dalam *cavity* konstan.
2. Nilai perpindahan panas untuk *natural convection* pada geometri bujur sangkar adalah 189,87 J/s sedangkan persegi panjang adalah 155,86 J/s. Nilai perpindahan panas untuk bujur sangkar lebih besar 21,82 % jika dibandingkan dengan persegi panjang. Hal tersebut disebabkan oleh luas penampang dari *vertical wall* bujur sangkar yang lebih besar 27,22 % dengan nilai 0,1865 m<sup>2</sup> sedangkan persegi panjang hanya 0,1466 m<sup>2</sup>. Koefisien konveksi yang ditunjukkan oleh *Nusselt number average* lebih besar 26,24 % untuk bujur sangkar. Nilai *Nusselt number average* bujur sangkar adalah 49,36 sedangkan persegi panjang hanya 39,1. Hal yang berbeda ditunjukkan dengan panjang (L) dari masing-masing geometri dimana bujur sangkar memiliki panjang 186,5 mm lebih kecil 46,54 % jika dibandingkan dengan persegi panjang yang memiliki panjang 237,3 mm. Lapisan termal yang lebih rapat pada *thermal boundary layer* dan kecepatan aliran di *velocity boundary layer* yang lebih cepat mengindikasikan nilai perpindahan panas yang lebih baik.
3. Fenomena *solidification* kondisi transien dengan *boundary condition* yang diberikan menyebabkan pelepasan energi panas dari fluida lebih dominan untuk ketiga sisi *wall* (*top*, *bottom*, dan *left wall*). Pergerakan *solid liquid interface* dan perkembangan lapisan es muncul dari ketiga *wall* tersebut

menuju *left wall* yang memiliki temperatur lebih panas. Perubahan fasa yang terjadi disebabkan oleh pelepasan panas laten dari fluida.

4. Peristiwa *solidification* dari cetakan es berbentuk persegi panjang menunjukkan pelepasan energi panas yang lebih besar daripada bujur sangkar, sehingga peristiwa *solidification* berlangsung lebih cepat daripada geometri lainnya. Pelepasan panas terbesar pada permukaan *top* dan *bottom wall* karena luas permukaan persegi panjang lebih besar 46.54%. Luas permukaan untuk *top* dan *bottom wall* dari persegi panjang adalah 0,2373 m<sup>2</sup> lebih besar dari bujur sangkar yang hanya 0,1865 m<sup>2</sup>. Rasio ketebalan lapisan es dari *right wall* dibanding panjang geometrinya ( $\delta/L$ ) memiliki nilai 0.92. Sedangkan untuk bujur sangkar, rasio ( $\delta/L$ ) bernilai 0,53 saat proses pembekuan 15 jam. Pembekuan air di dalam cetakan es berbentuk persegi panjang lebih cepat 7,03 % daripada bujur sangkar yang ditunjukkan oleh perkembangan *solid fraction* selama proses pembekuan 15 jam. *Solid fraction* dari air di dalam cetakan untuk persegi panjang memiliki nilai 1 sedangkan bujur sangkar masih bernilai 0,93.

## 5.2 Saran

Dari kesimpulan yang didapatkan, saran yang diberikan adalah sebagai berikut :

1. Bentuk persegi panjang lebih baik digunakan sebagai cetakan es di dalam industri es balok karena terbukti lebih cepat daripada bentuk bujur sangkar dalam proses *solidification*. Namun perlu diperhatikan luas *pond* dari cetakan es yang akan dibangun sehingga produksi es dapat lebih banyak dan lebih cepat.
2. Kajian mengenai bentuk geometri ini perlu dilanjutkan dengan eksperimen sehingga didapatkan hasil yang lebih baik dan akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bejan A. & Tien C.L. (1978), *Laminar natural convection heat transfer in a horizontal cavity with different end temperatures*, *J. Heat Transfer*, Vol. 100, pp. 641–647.
- Bejan A. (1979), *Note on Gill's solution for free convection in a vertical enclosure*, *J. Fluid Mech.*, Vol. 90, pp. 561–568.
- Bejan A. (2013), *Convection Heat Transfer, 4th Edition*, John Wiley & Sons, Canada.
- Bourdillon dkk. (2015), *Numerical simulations of water freezing processes in cavities and cylindrical enclosures*, *Applied Thermal Engineering*, Vol.75, pp. 839-855.
- Catton, I. (1978), *Natural Convection in Enclosures*, *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Toronto, Canada, 1978, Vol. 6, pp. 13–31.
- Çengel, Y. A. (2003), *Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd Edition*, McGraw-Hill.
- Fluent 6.3 User Guide. 2006. Lebanon. Fluent Inc.
- Hahn, D.W. & Ozisik, M.N. (2012), *Heat Conduction, 3rd Edition*, John Wiley & Sons, Canada.
- PT GEA Grasso Indonesia.” Standar Grasso untuk Pabrik Es Balok Indonesia”. [www.grasso-indonesia.com](http://www.grasso-indonesia.com). 1 Mei 2016.
- Rady M.A. & Mohanty A.K. (1996), *Natural convection during melting and solidification of pure metals in a cavity*, *Numerical heat transfer, Part A*, pp.49-62
- Vynnycky M. & Kimura S. (2007), *An analytical and numerical study of coupled transient natural convection and solidification in a rectangular enclosure*. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.50, pp. 5204-5214.
- McDonough M. W. & Faghri A. (1993), *Experimental and numerical analyses of the natural convection of water through its density maximum in a rectangular enclosure*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, pp.783-801.

- Michalek T. & Kowalewski T.A. (2003), *Simulations of the water freezing process: numerical benchmark*, pp. 389-408.
- Michalek T. & Kowalewski T.A. (2005), *Natural convection for anomaly density variation of water: numerical benchmark*, *Comp. Fluid Dynamics*. Vol.5, pp. 158-170.



## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan pada tanggal 23 Juni 1988 di Kabupaten Pati Provinsi Jawa Tengah. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Bujari dan Ibu Kaseni. Pendidikan dasar ditempuh di SDN Jambean 01 dan lulus pada tahun 2000. Pendidikan Menengah Pertama ditempuh di SMPN 3 Pati dan lulus pada tahun 2003. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMAN 1 Pati dan lulus pada tahun 2006. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di Perguruan Tinggi Negeri Diploma IV milik Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) yaitu Sekolah Tinggi Perikanan (STP) Jakarta pada tahun 2006-2010. Program Studi yang diambil adalah Permesinan Perikanan dibawah naungan Jurusan Teknik Penangkapan Ikan. Setelah selesai menempuh pendidikan tinggi tersebut, penulis diangkat menjadi salah satu pengajar di Politeknik Kelautan dan Perikanan (Poltek KP) Sorong pada program studi Mesin Perikanan dari tahun 2010. Penulis mendapatkan beasiswa dari KKP untuk melanjutkan pendidikannya untuk program magister di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2014 dan menyelesaikannya pada tahun 2016.